

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**В. М. Поліщук**

# **ФОТОМЕТРІЯ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів денної та заочної форм навчання  
освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2020**

УДК 535.23:628.98

**Поліщук В. М.** Фотометрія : конспект лекцій для студентів денної та заочної форм навчання освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / В. М. Поліщук ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 157 с.

Автор

канд. техн. наук, доц. В. М. Поліщук

Рецензент

**Г. О. Петченко**, доктор технічних наук, професор кафедри світлотехніки та джерел світла (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

*Рекомендовано кафедрою світлотехніки та джерел світла, протокол № 4 від 27.12.2019.*

Конспект лекцій містить інформацію щодо засад фотометрії, методів, способів та приладів вимірювання випромінення оптичної області спектру, які базуються на абсолютних та відносних вимірюваннях світлового потоку селективними та нейтральними приймачами випромінення. Наведені теоретичні та експериментальні методи фотометрії, які застосовуються в світлотехніці, під час розрахунку переносу випромінення в плазмі розрядних джерел світла, визначення фотометричних характеристик випромінювачів, у пірметрії тощо.

© В. М. Поліщук, 2020

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ТЕМА 1 ЗАВДАННЯ ФОТОМЕТРІЇ.....	7
ТЕМА 2 ЕТАЛОННА ФОТОМЕТРІЯ.....	10
2.1 Еталони для світлових вимірювань.....	10
2.1.1 Державний первинний еталон сили світла.....	10
2.1.2 Вторинні еталони сили світла.....	12
2.1.3 Світловимірювальні лампи світлового потоку.....	16
2.2 Методика застосування світловимірювальних ламп у фотометрії .....	17
ТЕМА 3 ФОТОМЕТРИЧНЕ ПРИЛАДДЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ.....	19
3.1 Фотометрична лава.....	19
3.2 Світловимірювальні голівки.....	20
3.2.1 Способи створення полів порівняння.....	20
3.2.2 Конструкція фотометричної голівки.....	23
3.3 Методи вимірювання сили світла.....	27
3.3.1 Методика вимірювання на фотометричній лаві візуальним методом.....	27
3.3.2 Методика вимірювання на фотометричній лаві фотоелектричними методами.....	28
ТЕМА 4 ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЕННЯ.....	31
4.1 Нейтральні приймачі випромінення.....	34
4.1.1 Термопары.....	35
4.1.2 Термостовпчики.....	36
4.1.3 Болметри.....	37
4.2 Селективні приймачі випромінення.....	39
4.2.1 Вакуумні фотоелементи.....	40
4.2.2 Фотоелектронні помножувачі.....	45
4.2.3 Фоторезистори.....	46
4.2.4 Фотодіоди.....	49
4.2.5 Селенові фотоелементи.....	52
ТЕМА 5 МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ.....	56
ТЕМА 6 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ. ФОТОМЕТРИ.....	62
6.1 Розподільчий фотометр.....	62
6.2 Інтегруючий фотометр.....	65
6.2.1 Теорія світломірної сфери.....	66
6.2.2 Конструкція фотометра.....	68
6.2.3 Методика вимірювання в інтегруючому фотометрі.....	69
6.3 Телецентричний фотометр.....	69
6.3.1 Телецентричний метод.....	69
6.3.2 Вимірювання сили світла й світлового потоку за допомогою фотометра АФМ.....	71
ТЕМА 7 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОСВІТЛЕНОСТІ. ЛЮКСМЕТРИ.....	74
7.1 Порівняльні характеристики та огляд люксметрів.....	76
7.2 Візуальні методи вимірювання освітленості.....	77
ТЕМА 8 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЯСКРАВОСТІ. ЯСКРАВОМІРИ.....	80

ТЕМА 9 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТІЛ.....	84
9.1 Вимірювання коефіцієнта дзеркального відбивання.....	86
9.2 Вимірювання коефіцієнта відбивання дифузно розсіюючих зразків.....	89
9.2.1 Фотометр відбиття ФО-1.....	89
9.2.2 Будова і принцип роботи фотометра.....	89
9.3 Вимірювання коефіцієнта направленого пропускання.....	91
9.4 Вимірювання коефіцієнта дифузного пропускання.....	92
9.5 Вимірювання коефіцієнта яскравості.....	93
ТЕМА 10 ОПТИЧНА ПІРОМЕТРІЯ.....	95
10.1 Оптичні методи визначення температури тіла.....	95
10.2 Еквівалентні температури.....	96
10.3 Радіаційний пірометр.....	97
10.3.1 Радіаційна (енергетична) температура.....	97
10.3.2 Принцип дії радіаційного пірометра.....	97
10.3.3 Методика вимірювання радіаційної температури.....	98
10.4 Яскравісні пірометри.....	99
10.4.1 Яскравісна температура.....	99
10.4.2 Пірометр із зникаючою ниткою.....	100
10.4.3 Методика вимірювання яскравісної температури.....	101
10.4.4 Фотоелектричні яскравісні пірометри.....	103
10.5 Колірні пірометри.....	104
10.5.1 Колірна температура.....	104
10.5.2 Методика вимірювання колірної температури.....	105
10.5.3 Колірні пірометри.....	106
ТЕМА 11 СПЕКТРАЛЬНІ ВИМІРЮВАННЯ.....	108
11.1 Параметри спектральних приладів.....	110
11.2 Освітлення вхідної щілини спектрального приладу.....	115
11.3 Конструктивні елементи спектральних приладів.....	120
11.3.1 Щілина спектрального приладу.....	120
11.3.2 Диспергуючі системи. Види диспергуючих систем.....	122
11.4 Монохроматори.....	125
11.4.1 Призменні монохроматори з лінзовою оптикою.....	125
11.4.2 Призменні монохроматори із дзеркальною оптикою.....	127
11.4.3 Дифракційні монохроматори.....	127
11.5 Вимірювання спектрів випромінювання.....	129
ТЕМА 12 КОЛЬОРОВІ ВИМІРЮВАННЯ.....	130
ТЕМА 13 ФОТОМЕТРІЯ СВІТЛОДІОДІВ.....	141
13.1 Методи вимірювання світіння світлодіодів.....	141
13.2 Колориметричні параметри світлодіодів.....	143
13.3 Гоніометричні характеристики світлодіодів.....	144
13.4 Експлуатаційні характеристики світлодіодів або тест на деградацію.....	145
ТЕМА 14 МЕТОДИ ІМПУЛЬСНОЇ ФОТОМЕТРІЇ.....	146
14.1 Вимірювання імпульсного випромінювання.....	150
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	156

## ВСТУП

Деякі прийоми кількісної оцінки світла були відомі ще в стародавньому Єгипті і древній Греції понад двох тисяч років тому. Інтерес до світлових вимірювань простежується в літературі, наприклад, в італійського художника і ученого Леона-Баттиста Альберті (1404-1472), італійського ученого Галілео Галілея (1564-1642), фотометричні дослідження описував італійський учений, інженер, живописець Леонардо да Вінчі (1452-1519).

Початком же фотометрії як науки вважають видання на початку XVIII сторіччя паризьким капуцином Франсуа Марі книги про вимір світла. Значну частину цієї книги написав французький математик, професор гідрографії П'єр Бугер (1698-1758).

Праці Бугера ґрунтувалися не лише на емпіричних даних, в них розвивалася теорія фотометрії. Теоретичну фотометрію розвивали також німецький астроном Йоганн Кеплер (1571-1630), німецький учений Йоганн Генріх Ламберт (1728-1777), Леонард Ейлер (1707-1783).

Роботи Бугера, Ейлера, Ламберта сформували теоретичну фотометрію як самостійну область прикладної математики, в якості якої вона викладалася разом з теоретичною механікою вже в XVIII ст.

Значний внесок у розвиток фотометрії внесли В. О. Михельсон (1860-1927), А. О. Гершун (1903-1952), В. О. Фок (1898-1974).

Фотометрія викладається в Харківському національному університеті міського господарства імені О. М. Бекетова з дня заснування єдиної на той час в Україні кафедри Світлотехніки та джерел світла (1964 рік) і є базовою для студентів, що навчаються за освітніми програмами Світлотехніка та джерела світла й Світловий дизайн середовища.

Засновниками наукової світлотехнічної школи України були Спренне Володимир Ріхардович, Намітоков Кемаль Кадирович, Овчинников Станіслав Степанович, Науман Володимир Вільгельмович, Салтиков Віктор Олександрович та інші.

Фотометричні методи, співвідношення і поняття застосовуються у будь-якій частині електромагнітного спектру від  $\gamma$ -лучей (довжина хвилі  $\lambda = 10^{-7}$  мкм) до випромінення генераторів змінного струму промислової частоти ( $\lambda = 6\,000$  км). Проте найчастіше їх використовують в оптичному діапазоні, тобто для ультрафіолетового (УФ,  $\lambda = 0,01-0,38$  мкм), видимого ( $\lambda = 0,38-0,78$  мкм) і інфрачервоного випромінення (ІЧ,  $\lambda = 0,78$  мкм–2,0 мм). Слід зазначити, що увесь діапазон інфрачервоного випромінення умовно ділять на чотири області:

- ближня:  $\lambda = 0,78-2,5$  мкм;
- середня:  $\lambda = 2,5-50$  мкм;
- далека:  $\lambda = 50-200$  мкм;
- терагерцова:  $\lambda = 200-2\,000$  мкм.

В інших діапазонах довжин хвиль цю ж сукупність теорій і методів зазвичай називають радіометрією.

## ТЕМА 1 ЗАВДАННЯ ФОТОМЕТРІЇ

Фотометрія – це розділ метрології, в якому вивчаються методи й прилади для виміру випромінення в оптичній області спектру, що складає  $10\text{--}10^6$  нм.

Дослівно фотометрія означає «міряю світло». Здавна людство цікавилось питанням, що таке світло, як виміряти його та що для цього потрібно. Всі дослідження в цієї області знань базувалися на візуальних методах. З появою фотоелектричних приймачів випромінення межі досліджень значно розширилися.

За видами всі фотометричні виміри можна класифікувати наступним чином:

- вимір енергетичних величин;
- вимір ефективних величин;
- вимір світлових величин;
- колориметричні вимірювання;
- спектральні методи вимірювання та прилади;
- вимірювання оптичних характеристик тіл;
- оптична пірометрія тощо.

Залежно від засобів, що використовуються для виміру фотометричних величин, всі вимірювання підрозділяються на візуальні, коли приймачем випромінення служить око людини, й фотоелектричні, коли приймачем служить технічний пристрій, робота якого заснована на різних фізичних принципах. Основний обсяг вимірювань в наш час, як правило, проводиться засобами фотоелектричної фотометрії.

Фотографічна фотометрія, що використовується для кількісної оцінки енергії світла фотоматеріалів, застосовується в основному для оцінки потужності випромінення у фоточутливих матеріалах.

Теоретичні й експериментальні методи фотометрії знаходять застосування у більшості галузей науки й виробництва, наприклад, у техніці освітлення і сигналізації, при хімічному аналізі речовин, при розрахунках перенесення

випромінення у середовищах, що розсіюють світло, у газовому середовищі розрядних джерел світла, в астрономії для дослідження космічних джерел випромінення, при розрахунках теплообміну випромінення і таке інше.

Основна схема фотометричних вимірів складається з трьох складових і може бути представлена графічно, як показано на рисунку 1.1.

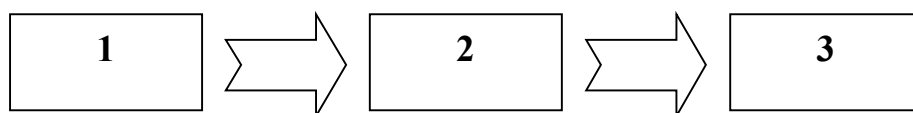


Рисунок 1.1 – Структурна схема фотометричних вимірювань:

1 – джерело випромінення; 2 – проміжне середовище;

3 – приймач випромінення

**Джерело випромінення**, що використовується у схемі, може мати відомі параметри або бути досліджуваним об’єктом. При відносних вимірах можуть використовуватися джерела, параметри яких не відомі, але мають високий рівень стабільності параметрів у продовж всього процесу вимірювання.

Існують стандартні джерела випромінення типу А, В, С, D, Е, які застосовуються у фотометричних вимірах з відомими значеннями щільності випромінення та кольорової температури. При проведенні експерименту слід обов’язково вказати тип джерела, що застосовувалося.

**Проміжне середовище** – це середовище, в якому розповсюджується випромінення. До середовища також належать різні оптичні елементи, що дозволяють змінювати потік випромінення за потужністю, напрямком у просторі та за спектром.

**Приймачі випромінення** – це пристрої, що перетворюють енергію оптичної області спектру в інші види енергії. При проведенні фотометричних вимірів параметри приймачів випромінення повинні бути відомими з достатнім ступенем точності, а при відносних вимірах – стабільними впродовж вимірювання. У практиці фотометричних вимірювань, як правило, використовуються фотоелектричні приймачі випромінення, що перетворюють енергію оптичної області спектру в електричну, тобто в електричний сигнал.



До найбільш відомих фотоелектричних приймачів випромінення належать термостовпчики, фотодіоди, фоторезистори, вакуумні фотоелементи та фотоелектронні помножувачі.

Слід зазначити, що кожен з вищеназваних трьох елементів може бути досліджуваним. При цьому два інші повинні бути відомі, а при відносних вимірах мати стабільні параметри протягом всього часу проведення вимірів.

При вимірюванні ефективних величин відносна спектральна чутливість приймача випромінення повинна відповідати кривій відносної спектральної чутливості зразкового приймача, який береться за основу побудови даної системи ефективних величин. Для приведення спектральної чутливості приймача випромінення до чутливості зразкового приймача служить коригуючий фільтр.

Виміри, які проводять у фотометрії можуть бути прямими, побічними й сукупними.

При проведенні вимірів, як правило, з'являються похибки. Вони бувають систематичними й випадковими. Систематичні похибки з'являються при кожному вимірі в результаті відхилення даних виміру від істинного значення на одну й ту ж величину. Вони завжди присутні у вимірах, не залежать від операторів і враховуються як похибка виміру. За дійсний результат приймається середнє арифметичне значення результатів вимірювань. Для цього проводять аналіз похибок. Якщо похибка вимірювання в три і більше разів відрізняється від середнього його значення, то такий результат слід вважати промахом виміру і його вилучають з ряду даних.

На практиці при проведенні фотометричних вимірювань часто застосовують метод порівняння відомої за значенням величини та вимірюваної величини. Відомою величиною може бути еталон або зразковий об'єкт, значення фізичної величини якого надано з достатнім ступенем точності, що дозволяє при порівнянні говорити про ймовірність і точність виміру досліджуваної величини. Для фотометричних вимірювань таким еталоном служить еталон сили світла як основна одиниця системи SI.

## ТЕМА 2 ЕТАЛОННА ФОТОМЕТРІЯ

### 2.1 Еталони для світлових вимірювань

#### 2.1.1 Державний первинний еталон сили світла

**Еталон** – це технічний пристрій, який служить для найбільш точного відтворення, збереження та передачі фізичної величини.

Основною фотометричною одиницею є одиниця сили світла – кандела. Це одна із семи основних незалежних одиниць Міжнародної системи одиниць (SI).

До недавнього часу кандела відтворювалась за допомогою еталона, що використовує сяйво чорного тіла, яскравість якого при температурі твердіння чистої платини прийнято за  $60 \text{ кд/м}^2$ . Такий світловий еталон добре описано у багатьох виданнях і, при необхідності, з ним можна ознайомитися.

У Національному науковому центрі «Метрологія» розроблена установка для відтворення еталону сили світла, яка докорінно відрізняється від попередньої. Основним елементом даного пристрою є фотометр освітленості, який своєю появою в значній мірі зобов'язаний появою високоякісних кремнієвих фотодіодів. Слід відзначити, що фотометри самі не переносять одиницю сили світла, а тільки забезпечують одиницю освітленості. Використання фотометрів як еталонів сили світла можливе тільки при точно виміряній відстані.

Еталонні фотометри складаються з приймачів (як правило, кремнієвих фотодіодів), коригуючого фільтра, апертури і в деяких випадках розсіювача (косинусної насадки). Фільтр для  $V(\lambda)$  – корекції приводить загальну спектральну чутливість фотометра (фотодіод + фільтр + розсіювач) до функції  $V(\lambda)$  – відносної спектральної чутливості ока. Фотометрична голівка не потребує косинусної корекції, тому що фотометр звичайно використовується з еталонною лампою розжарення, яка розміщується на осі фотометра на значній відстані, щоб забезпечити нормально падаюче світло з малим кутом розходження.

Важливою вимогою до еталонного фотометра є те, що його площа відліку має бути точно і ясно визначеною. Якщо площину відліку фотометра визначено помилково, закон зворотних квадратів неточно визначає сигнал як функцію відстані.

Для точного визначення площини відліку фотометра еталонний фотометр повинен мати апертуру спереду, як показано на рисунку 2.1, де зображено фотометр. Площина відліку фотометричної голівки включає гострі краї апертури.

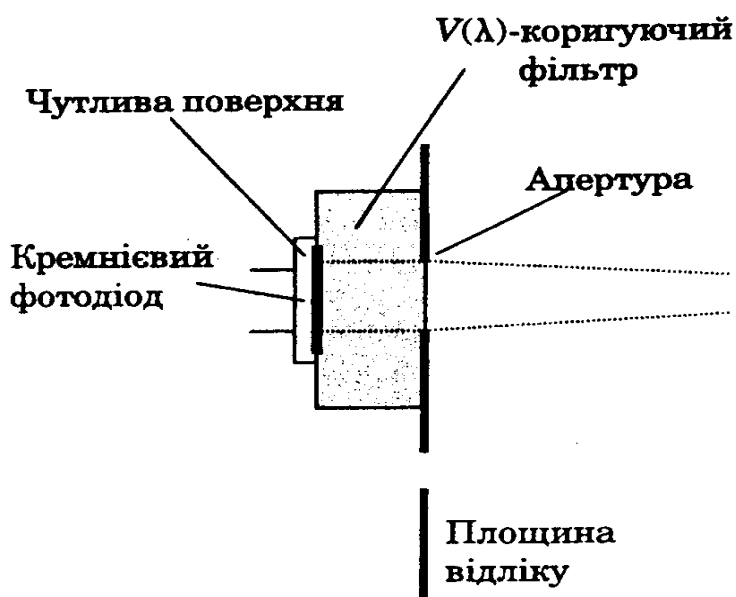


Рисунок 2.1 – Еталонний фотометр освітленості

**Температурна залежність.** Чутливість фотометра є функцією температури. Коефіцієнт пропускання фільтра, який складається із кольорового скла, суттєво змінюється з температурою. Похибки вимірювання мають місце, коли фотометр використовується при температурі навколишнього середовища, яка відрізняється від тієї, що була при калібруванні.

**Лінійність.** Високоякісні кремнієві фотодіоди, які з'явилися недавно, мають лінійну характеристику в декілька порядків величини і лінійність еталонних фотометрів не є проблемою при рівнях освітленості менше  $10^3$  лк. Проте еталонні фотометри можуть оцінюватися за лінійністю в усьому діапазоні освітленостей, в якому фотометри використовуються.

**Довгочасна стабільність.** Чутливість високоякісних еталонних фотометрів є дуже стабільною. Слід відзначити, що чутливість фотометра може змінюватися через великий період часу. У той час як визначені типи кремнієвих фотодіодів мають відому стабільність у часі, коефіцієнт пропускання коригуючого фільтра змінюється з часом. У деяких випадках на поверхні фільтра формуються мутні відкладення. Довгочасний дрейф фотометрів можна виміряти тільки періодичним калібруванням фотометра за іншим надійним еталоном (наприклад, еталонною лампою обмеженим часом горіння або абсолютним радіометром).

**Калібрування.** Чутливість еталонних фотометрів у амперах на люкс або вольтах на люкс, як правило, визначається калібруванням еталонних фотометрів за джерелом типу А. Температура навколишнього середовища (звичайно 25 °C), фотометрична відстань, рівень освітленості й площа відліку реєструються.

### 2.1.2 Вторинні еталони сили світла

Для передачі одиниці сили світла від первинного державного еталону до дослідницьких лабораторій і відділів контролю підприємств використовують еталони другого порядку (вторинні еталони).

Вторинні еталони сили світла найчастіше являють собою декілька груп ретельно виготовлених вольфрамових ламп розжарення із прямими нитками розжарення, натягнутими у габаритах прямокутника і розташованих в одній площині, від якої відлічується відстань від лампи до поверхні, що освітлюється. Колби цих ламп мають конічну форму, яка усуває шкідливий вплив відбивань від задньої стінки світловимірювальної лампи, відбите при цьому випромінення відводиться вбік і не попадає в зону вимірювання (рис. 2.2).

Сила світла ламп вторинного еталону вимірюється у визначеному напрямі перпендикулярно до площини нитки розжарення та відповідно передній стінці лампи. Ці лампи повинні мати відтворювані й стабільні вихідні характеристики протягом довгого терміну використання.

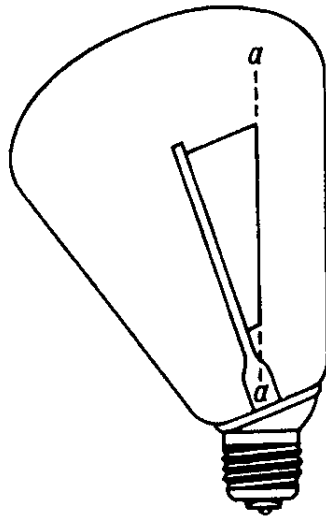


Рисунок 2.2– Світловимірвальна лампа розжарення  
(а-а – площа нитки розжарення)

У наш час ламповими еталонами сили світла також є кварцові галогенні лампи й лампи розжарення. Багато різновидів ламп, що виготовлялися в минулому, або вже більше не існують, або є дуже дорогими. Нестача еталонних ламп високої якості і не дуже великої вартості є світовою проблемою. На рисунку 2.3 наведені деякі з еталонних ламп, що широко використовуються в США та Європі.

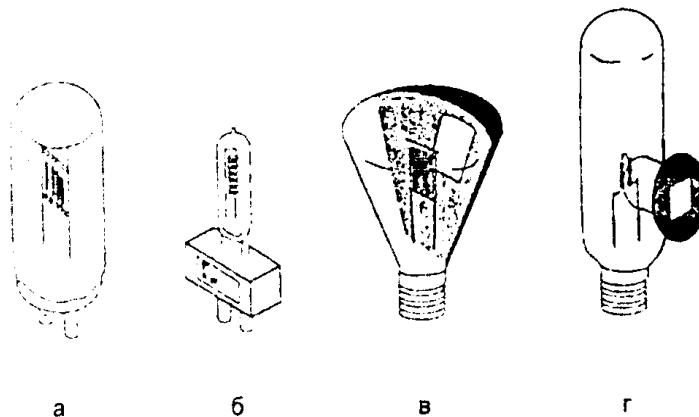


Рисунок 2.3 – Деякі типи сучасних еталонних ламп, що використовуються в США і Європі

У США застосовується 120-вольтова газонаповнена лампа розжарювання типу Airway Beacon General Electric (рис. 2.3, а). Нитка розжарення має

односпіральний контур, сформований в одній площині – «моноплан», і двоштирьковий цоколь, який дозволяє прецизійне юстування з використанням юстуючого приладу (дзеркало знаходиться на цоколі ) і лазера. Лампи мають різні модифікації за потужністю (від 100 до 1 000 Вт) і можуть бути з прозорим або матовим балоном.

1 000-ватна кварцова галогенна лампа типу Osram Sylvania (рис. 2.3, б) має спіральну нитку розжарення, механічно закріплену з обох кінців без підтримки всередині. Балон лампи прозорий або матовий. Ця лампа сконструйована для експлуатації при номінальній напрузі живлення 110 В, струмі 8,1 А, температурі близько 3100 К.

Газонаповнена лампа розжарення типу Osram Wi 41/G (30 В, 175 Вт) має форму колби у вигляді оберненого конуса (рис. 2.3, в). На колбу нанесено чорне покриття за винятком апертури, так щоб на оптичній осі було видно тільки нитку розжарювання. Це захищає від виходу назовні світла при внутрішніх відбиттях від колби та інших частин лампи. Ця лампа має пряму проволочну нитку розжарення монопланової структури, яка забезпечує плавний кутовий розподіл інтенсивності і для прецизійного юстування дозволяє використовувати телескоп. Лампа сконструйована для експлуатації при температурі близько 2 750 К.

Газонаповнена лампа розжарення типу Polaron LIS (12,7 В, 320 Вт) на циліндричному вхідному отворі має плоске вікно (рис. 2.3, г), розташоване на відстані від нитки розжарення. Така конструкція зменшує ефект почорніння і також дозволяє прецизійне юстування за допомогою лазера. Лампа має товсту низьковольтну нитку розжарення, що робить її стійкою до ударів. Вона спроектована для експлуатації при температурі 2 856 К.

Традиційні газонаповнені еталонні лампи, як правило, мають велику колбу для зменшення почорніння і забезпечення кращих характеристик старіння.

В Україні використовуються лампи, основні параметри яких наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри світловимірювальних ламп сили світла

Тип лампи	Сила світла, кд	Кольорова температура тіла розжарення, К	Напруга, В	Потужність, Вт
СИС – 5-1	1	2 860	5	1,2
СИС – 10-5	5	2 360	10	8,6
СИС – 10-10	10	2 360	10	16,8
СИС – 40-100	100	2 860	40	75
СИС – 107-35	35	2 360	107	56
СИС – 107-100	100	2 360	107	158
СИС – 107-500	500	2 800	107	365
СИС – 107-1000	1 000	2 800	107	660
СИС – 107-1500	1 500	2 860	107	915

У світловимірювальних лампах суттєве значення мають якість балона, його форма, конфігурація і кривизна поверхні стінок, а також стан внутрішньої та зовнішньої поверхонь. Особливо важливі оптичні властивості скла, оскільки випромінювання, яке виходить у напрямку спостерігача, залежить від проходження, відбиття та розсіювання внутрішньою поверхнею балона.

До тіла розжарення світловимірювальних ламп ставлять особливі вимоги. Залежно від типу ламп воно має різну форму і змонтовано у вигляді відрізків прямолінійних або спіральних ниток, розташованих паралельно, точно в одній площині і натягнутих за допомогою спеціальних тримачів.

Розташування тіла розжарення в одній площині необхідно тому, що саме від цієї площини відраховується відстань до приймача випромінювання.

### 2.1.3 Світловимірювальні лампи світлового потоку

Світловий потік не є основною одиницею, хоча сперечання з цього приводу досить давно ведуться серед світлотехніків щодо необхідності відтворення саме канделу через потужність випромінювання, що було б значно надійніше і зручніше. У всякому разі світловий потік залишається одним з найважливіших параметрів будь-якого джерела випромінювання. Тому світловимірювальні лампи для відтворення нормованих світлових потоків знаходять широке впровадження при проведенні світлових вимірювань.

Конструктивно світловимірювальні лампи світлового потоку аналогічні звичайним лампам розжарення, однак вони відрізняються від них деякими конструктивними особливостями і насамперед ретельним виготовленням.

Виходячи з вимог рівномірності опромінювання колби цих ламп виготовляють по можливості близькими за формою до сфери з однаковою товщиною стінки всієї поверхні. Тіло розжарення у лампі повинно бути максимально розосереджене, щоб забезпечити однакову силу світла у всіх напрямках простору. Така конструкція забезпечується тілом розжарення у вигляді тонких ниток, які розташовані рівномірно відносно осі лампи. Крім того тримачі ниток виготовляються з товстої проволочки, щоб виключити можливість її коливань або руйнування.

Промислово випускаються лампи для вимірювання світлового потоку. Основні параметри світловимірювальних ламп світлового потоку наведені в таблиці 2.2.

Світловимірювальні лампи світлового потоку виконують двох видів: вакуумні з кольоровою температурою нитки розжарення 2 360 К і газонаповнені з кольоровою температурою 2 800 К. Тривалість горіння цих ламп не оговорюється. Вони вважаються придатними протягом часу, коли вимірювання їх світлового потоку не перевищує нормованих значень.



При використанні цих ламп допускається будь-яке положення їх у просторі, але в такому випадку необхідно забезпечити однакові умови протягом всіх вимірювань.

Таблиця 2.2 – Основні параметри світловимірювальних ламп світлового потоку

Тип лампи	Світловий потік, лм	Кольорова температура тіла розжарювання, К	Напруга живлення, В	Потужність, Вт
СИП 3,5-10	10	2 360	3,5	2
СИП 10-50	50	2 360	10	9
СИП 35-150	150	2 360	35	22
СИП 35-500	500	2 800	35	40
СИП 107-500	500	2 360	107	74
СИП 107-1500	1 500	2 800	107	118
СИП 107-3500	3 500	2 800	107	260
СИП 107-20000	2 0000	2 800	107	1400

## 2.2 Методика застосування світловимірювальних ламп у фотометрії

Застосування світловимірювальних ламп потребує виконання певних правил експлуатації. Існує система нормативно технічної документації, що оговорює ці правила. Перш за все кожна світловимірювальна лампа повинна мати паспорт і свідоцтво про перевірку з наведеними параметрами лампи й режимами її застосування. У результаті ознайомлення з цією документацією встановлюється розряд лампи та можливості її використання для даних вимірювань. З урахуванням допустимої відносної похибки вимірювань для даного розряду ламп проводяться вимірювання та оцінюється їх точність.

При використанні світловимірювальних ламп необхідно вести поточний облік часу їх горіння. З урахуванням цього часу потрібно дотримуватися встановленого періоду повторних перевірок ламп, які виконуються шляхом їх порівняння з лампами більш високого порядку способом заміщення.

Вимірювання слід проводити в нормальних кліматичних умовах: температура навколишнього середовища  $15 - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  , відносна вологість повітря не більше 80% при нормальному атмосферному тиску.

Важливими є умови приєднання ламп до патронів. З'єднання цоколя лампи з патроном повинно бути міцним і стійким у часі, забезпечувати надійний електричний контакт, який виключає зростання температури елементів.

Робочий час лампи має бути невеликим. Перед початком вимірювань лампи потрібно витримувати при робочій напрузі протягом 5 – 10 хвилин залежно від електричної потужності лампи.

## ТЕМА 3 ФОТОМЕТРИЧНЕ ПРИЛАДДЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ

### 3.1 Фотометрична лава

Фотометрична лава – це технічний пристрій, який служить для проведення досліджень та вимірів фотометричних величин шляхом зміни освітленості (яскравості) одного або двох полів порівняння на підставі закону зворотних квадратів. Конструкція фотометричної лави дає змогу змінювати й точно вимірювати відстані між джерелами світла та приймачем оптичного випромінювання.

Добре відомі одно - та двобічні фотометричні лави. Вони складаються з двох направляючих, які виконані з труб визначеного діаметру, що дозволяє кріпити на них всі необхідні пристрої. На одній з направляючих нанесена шкала у міліметрах для проведення замірів відстаней між предметами при розрахунках сили світла за законом зворотних квадратів та ін.

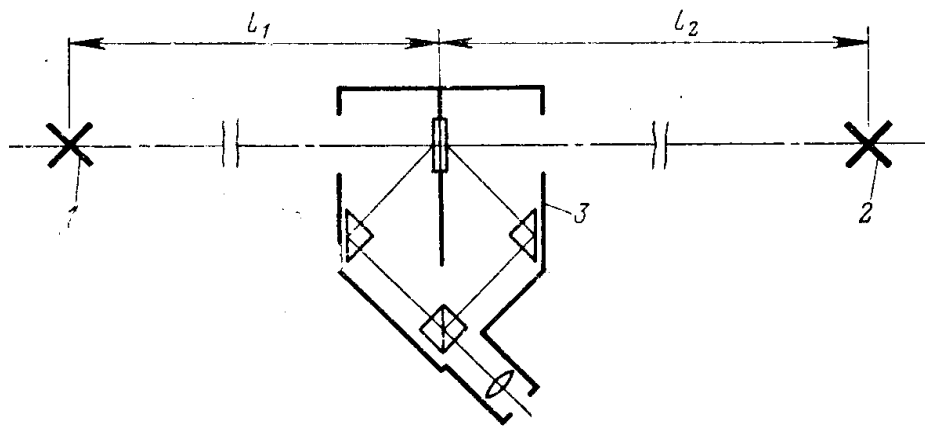


Рисунок 3.1 – Двобічна фотометрична лава

На цей час добре відомі фотометричні лави, що мають довжину від 0,5 до 4,0 метрів. Для досліджень використовують, як правило, двосторонні лави, по обидві сторони яких можуть розташовуватися джерела світла. Для цього на фотометричній лаві передбачено кріплення для джерел світла. Вибір довжини лави залежить від габаритних розмірів досліджуваного джерела та

забезпечення визначеного ступеня точності, яка залежить від виконання умов точності.

Для запобігання впливу на результати вимірів додаткового випромінення, що виникає внаслідок відбиття світла від стін, конструктивних елементів джерел світла і т.ін. по обидві сторони ламп встановлюють захисні непрозорі екрани і щити з отвором для проходження випромінення в необхідному напрямку (рис. 3.2). Ці захисні екрани повинні бути пофарбовані чорною матовою фарбою або обклеєні чорним бархатом.

Вимірювання, які проводяться на фотометричній лаві, можуть бути візуальними й фотоелектричними.

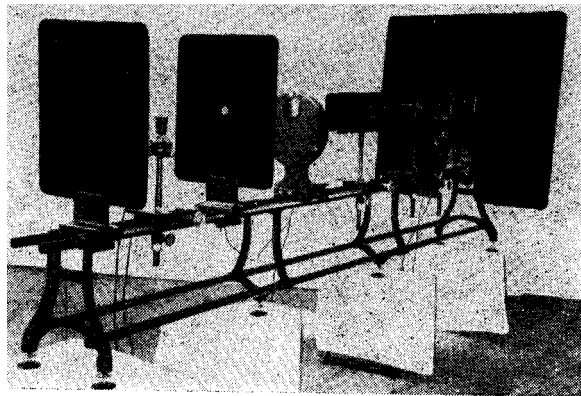


Рисунок 3.2 – Двобічна лава із захисними екранами й діафрагмами

### **3.2 Світловимірювальні голівки**

#### **3.2.1 Способи створення полів порівняння**

Поля порівняння являють собою освітлювальні поверхні, що знаходяться у зіткненні одна з одною та використовуються для візуальних досліджень. Око людини реагує на яскравість, яка є однією з основних характеристик світлої поверхні. Дві яскравості вважаються рівними, якщо вони викликають однакові зорові почуття в одному і тому ж місці сітчатки ока людини. Рівність яскравості полів порівняння свідчить про те, що освітленість полів порівняння однакова.

Око як учасник світлових вимірів потребує наявності в світловимірювальній пристрої або приладі двох полів порівняння, що

знаходяться поруч. Звідси необхідно, щоб у вимірах брали участь два джерела випромінення або два пучки світла від одного й того ж джерела. Досить часто для створення рівнояскравісної поверхні використовують досліджувальні платівки. Око спостерігає їх яскравість, яка залежить від освітленості, а остання, в свою чергу, може бути обумовлена будь-якою вимірювальною величиною.

Одним з основних завдань всякого візуального світловимірювального приладу, як було сказано вище, є створення полів порівняння. Існує багато різних способів створення полів порівняння.

**1. Пляма Бунзена.** Однією з перших було відомо про пляму Бунзена. Вона являє собою промасляну пляму всередині аркуша паперу. Папір освітлювався з обох сторін. Спостерігач знаходився з будь-якої сторони і бачив пляму всередині папіру. Його яскравість залежить від освітленості як одного, так і іншого джерела світла, тому що пляма як пропускає, так і відбиває світло. Навколо плями розташоване друге поле порівняння, яскравість якого залежить тільки від одного джерела, яке освітлює його (обирається досить щільний папір з малим коефіцієнтом пропускання). Те, що на яскравість плями впливає освітленість від обох джерел світла, є суттєвим недоліком. Крім того досить важко отримати вирівнювання яскравостей полів порівняння внаслідок того, що пляма дещо змінює колір джерела світла.

**2. Призма Ритчі.** Це також досить давній спосіб створення полів порівняння. Дві грані призми розташовані одна до другої під кутом  $90^\circ$  (рис. 3.3). Кожна з сторін освітлюється окремо джерелами світла, причому промені падають під кутом  $45^\circ$ . Призма виготовляється з білого розсіючого світло матеріалу, наприклад гіпсу, вуглекислого магнію тощо. Спостерігач дивиться на обидві сторони призми під тими ж кутами в  $45^\circ$ , так що лінія зору перпендикулярна до лінії, що з'єднує обидва джерела світла. Цей спосіб отримання полів порівняння досить часто застосовують і дотепер.

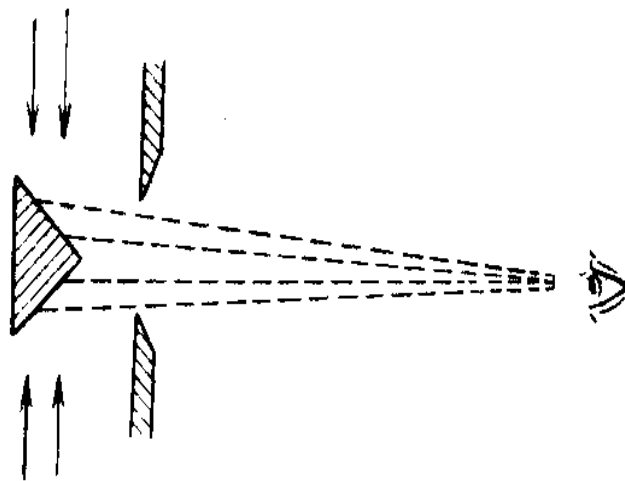


Рисунок 3.3 – Призма Ритчі

3. **Кубик Люммера – Бродхуна.** Дві призми повного внутрішнього відбиття з прозорого скла зіткаються діагональними площинами. Подібний оптичний пристрій досі є найкращим для отримання полів порівняння. На рисунку 3.4 наведено будову цього кубика, як було вперше запропоновано. Одна призма являє собою звичайну призму повного внутрішнього відбиття ( $45^\circ$ ), друга – майже така, але більша частина її діагональної поверхні виконана у вигляді кулі і площа збережена лише на маленькій ділянці, яка має вигляд кола. Саме в цьому місці зіткаються по колу обидві призми, причому досить щільно. Вони або притираються одне до одного, або склеюються. У місці зіткнення призм створюється оптичний контакт. Крізь нього промені світла вільно проходять. Обидві ці призми, що в сукупності називаються кубиком Люммера – Бродхуна, дозволяють оку спостерігача бачити немовби в одному місці обидва поля порівняння, які в дійсності розташовані у двох різних місцях. Оптичний контакт легко виготовити настільки щільно, що за умови рівності яскравості обох полів порівняння лінія розділу між ними стає зовсім невидимим для ока. Обидва поля начебто зливаються в одне. Існує декілька варіантів створення полів порівняння, запропонованих вченими Люммером і Бродхуном. Найбільш розповсюдженим є кубик, що також складається з двох призм. Одна являє собою призму повного внутрішнього відбиття без будь-яких змін. На другій по діагональній площині зроблені незначної глибини вирізи.

Відбиті промені проходять крізь кубик в місці оптичного контакту, або відбиваються від діагональної площини для другого поля порівняння.

Завдання описаних способів створення полів порівняння заключається в тому, щоб дати можливість спостерігачу бачити порівнювальні пластини розташованими поруч, причому в одній площині, тоді як в дійсності світящі поверхні можуть бути розташовані як завгодно відносно одна одній.

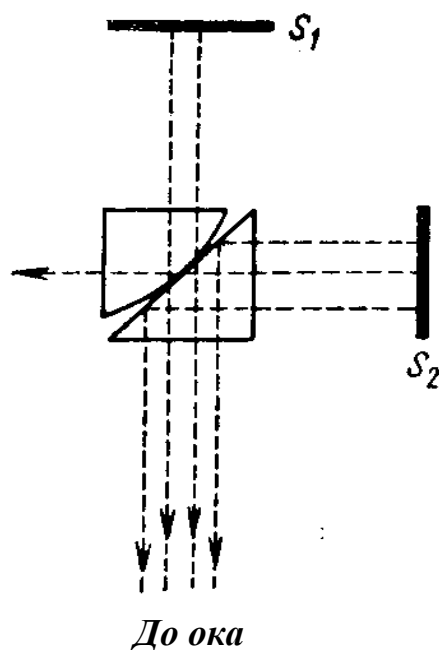


Рисунок 3.4— Кубик Люммера-Бродхуна

### 3.2.2 Конструкція фотометричної голівки

В цілому ряді світловимірювальних пристроїв застосовується або як відокремлений прилад, або як частина приладу так називаємо світловимірювальна голівка. Вона представляє сукупність випробувальних пластинок (однієї або двох), кубика, дзеркал, призм повного внутрішнього відбиття та лінз, що служать для створення полів порівняння. Запропоновано досить багато світловимірювальних голівок. Як і у багатьох приладів кожна з них має свої достоїнства та недоліки. Достоїнство тієї або іншої фотометричної голівки іноді обумовлено не тільки улаштуванням, а й ступенем придатності до цієї вимірювальної установки, а також якістю виготовлення.

Основними конструктивними елементами сучасної фотометричної голівки, є білий світлорозсіючий екран БСЕ (випробувальна платівка), який служить для виключення надходження в око спостерігача направленого випромінення великої яскравості. Око реагує на яскравість випробувальної платівки, яка залежить від освітленості, що створюється джерелом випромінення, яке, в свою чергу, обумовлює будь-яку фотометричну величину. В багатьох конструкціях приладів необхідні поля порівняння від двох різних джерел створюються за допомогою двох випробувальних платівок. Іноді можна обійтися однією, якщо використовувати обидві її сторони. Білий світлорозсіючий екран повинен бути обов'язково білим, тобто неселективно відбивати випромінення, не змінюючи його спектрального складу, крім того мати рівнояскраву поверхню, яскравість якої повинна бути однаковою у всіх точках та напрямках поверхні (Ламбертів випромінювач). Як матеріал для виготовлення БСЕ використовують гіпс ( $\text{CaSO}_4$ ), окис магнію ( $\text{MgO}$ ), вуглекислий магній ( $\text{MgCO}_3$ ) та сіркобарієву сіль ( $\text{BaSO}_4$ ). Порівняльні значення коефіцієнтів відбиття таких БСЕ, які виготовлено з різних матеріалів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльні значення коефіцієнтів відбиття матеріалів

Матеріал платівки	Гіпс ( $\text{CaSO}_4$ )	Окис магнію ( $\text{MgO}$ )	Вуглекислий магній ( $\text{MgCO}_3$ )	Сіркобарієва сіль ( $\text{BaSO}_4$ )
Значення коефіцієнта відбиття, $\rho\%$	0,90 - 0,92	0,97 - 0,99	0,97 - 0,99	0,93 - 0,96

Встановлено, що гіпс найбільше придатний для виготовлення випробувальних платівок методом лиття в різні форми. Міжнародна комісія з освітлення (МКО) прийняла в якості речовини для випробувальних платівок окис магнію ( $\text{MgO}$ ). З окису магнію легко одержати матову й чисту поверхню. Коефіцієнт яскравості окису магнію вище, ніж у інших речовин і наближений до одиниці. Однак платівка з окису магнію не дуже міцна, легко забруднюється і не підлягає чистці. Найбільш зручно для світлових вимірювань застосовувати сіркобарієву сіль ( $\text{BaSO}_4$ ), платівки з якої значно міцніші, легко очищуються без порушення поверхні.



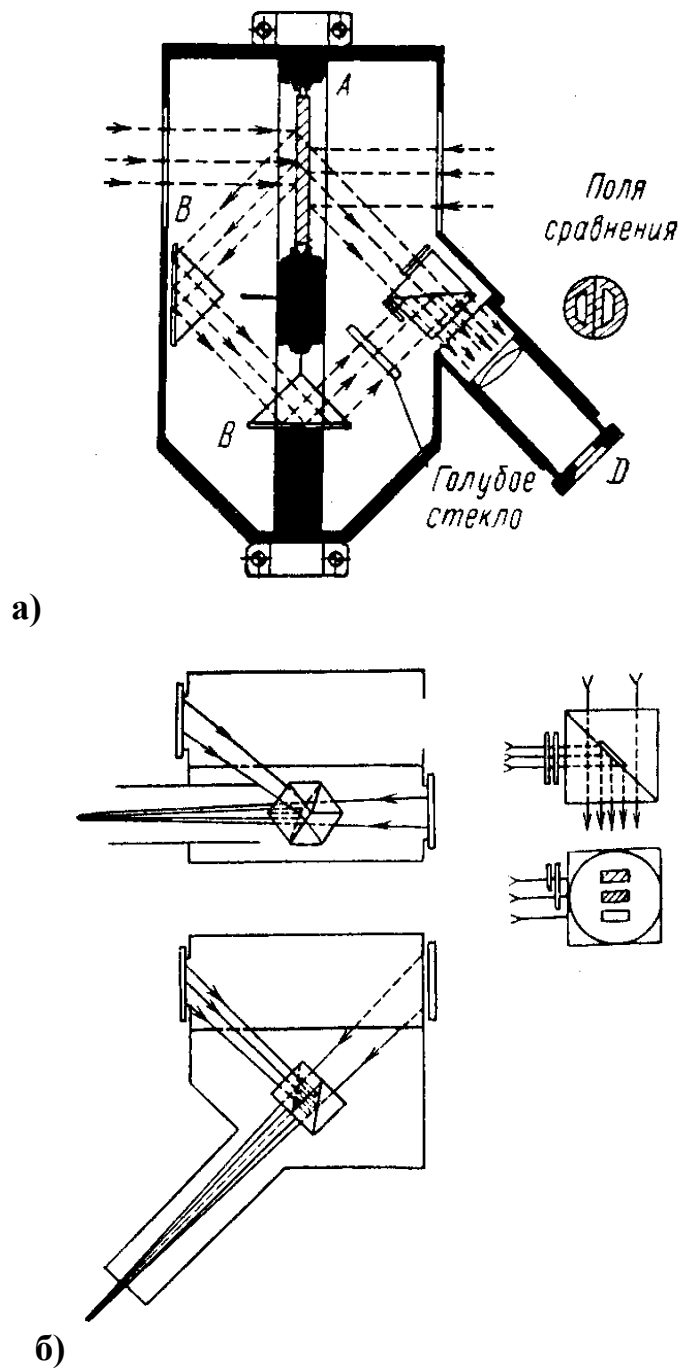


Рисунок 3.5 – Світловимірювальні голівки :

а) – за Люммером-Бродхуном, б) – ВНДІДС

На рисунку 3.6 наведено оптичну схему фотометричної голівки з використанням двох сторін однієї випробувальної платівки (білого світлорозсіючого екрану).

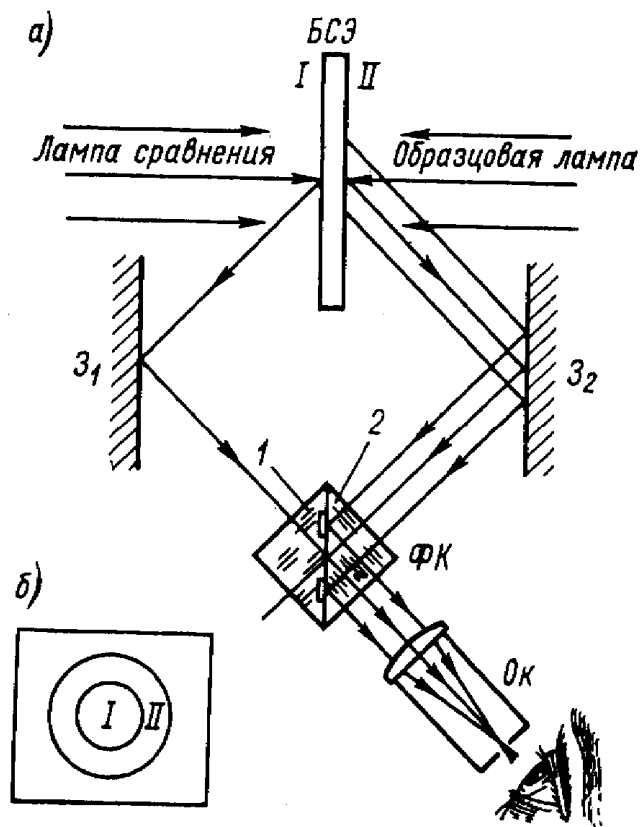


Рисунок 3.6 – Схема фотометричної голівки

1. Білий світлорозсіюючий екран БСЭ з однієї сторони освітлюється лампою порівняння, з іншої – досліджуваною лампою.

2. Світло, розсіяне поверхнями БСЭ, надходить на дзеркала Дз1 і Дз2 і відбивається в напрямку розташування фотометричного кубика (ФК).

3. Випромінювання, відбите дзеркалами проходить через фотометричний кубик, як показано на рисунку 3.6.

4. Фотометричний кубик створює на зіткнених ділянках поверхні полів порівняння зображення двох сторін БСЭ разом в одній площині.

5. Окуляр (Ок) дозволяє спостерігачеві бачити поля порівняння й спостерігати за ними.

Внутрішня частина корпусу фотометричної голівки зачорнена, на шляху проходження випромінювання встановлені екрани з отворами (діафрагмами).

Всі конструктивні елементи фотометричної голівки виконують з гострими гранями й краями для запобігання попаданню відбитого від граней конструкції світла джерела випромінювання до випробувальної платівки. Фотометрична

голівка повинна являти собою повністю закриту від пилу коробку, яка захищає внутрішні оптичні елементи від забруднення.

### 3.3 Методи вимірювання сили світла й створення вторинних еталонів сили світла

#### 3.3.1 Методика вимірювання на фотометричній лаві візуальним методом

1. На фотометричній лаві по обидві сторони розташовують джерела випромінювання, один з яких еталонний, а другий-досліджуваний. Між ними на каретці пересувається фотометрична голівка (рисунок 3.7). Пересуваючи каретку по фотометричній лаві, необхідно добитися фотометричної рівноваги полів порівняння. Для цього необхідно, щоб яскравості двох полів порівняння були однакові:

$$L_1 = L_2 \quad (3.1)$$

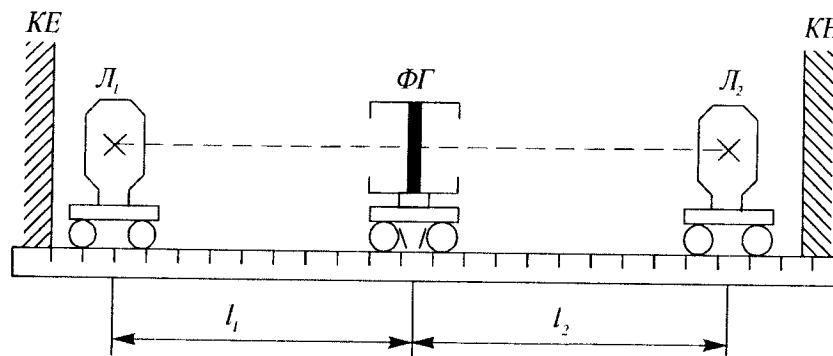


Рисунок 3.7 – Схема вимірювання сили світла джерела випромінювання на фотометричній лаві візуальним методом

2. Для поверхні, що дифузно розсіює, виконуються рівняння

$$E_1 \rho_1 \tau_1 = L_1 \pi, \quad (3.2)$$

$$E_2 \rho_2 \tau_2 = L_2 \pi. \quad (3.3)$$

$$\text{Якщо} \quad L_1 = L_2, \quad (3.4)$$

$$\text{то} \quad I_1 \rho_1 \tau_1 / l_1^2 = I_2 \rho_2 \tau_2 / l_2^2, \quad (3.5)$$

де  $\rho$ ,  $\tau$  - оптичні коефіцієнти.

3. Для виконання розрахунків проводять відлік відстаней між фотометричною голівкою й джерелами світла:  $l_1$  і  $l_2$ .

4. Далі за формулою:

$$I_1 = I_2 \frac{\rho_2 \tau_2}{\rho_1 \tau_1} \cdot \frac{\ell_1^2}{\ell_2^2} \quad (3.6)$$

виконують розрахунок сили світла джерела 1.

Оптичні коефіцієнти враховують нерівномірність роботи фотометричної голівки: різні коефіцієнти відбиття білого світлорозсіючого екрану, що відбиває світло, різні коефіцієнти пропущення призми, дзеркал, які є конструктивними елементами голівки.

Як правило, відношення коефіцієнтів  $\rho_2 \tau_2 / \rho_1 \tau_1$  близьке до одиниці і для спрощення вимірів і розрахунків його приймають за одиницю.

Для більш точних вимірів пропонується:

- можливість обертання фотометричної голівки на 180 градусів, що дає змогу змінити положення сторін на протилежні, або
- поміняти місцями еталонну й досліджувану лампи. Також можна визначити кількісну величину оптичних коефіцієнтів математично.

### 3.2.2 Методика вимірювання на фотометричній лаві фотоелектричними методами

При вимірюванні світлових величин (наприклад, сили світла) фізичним об'єктивним методом замість фотометричної голівки використовують фотоелемент, що розміщується на фотометричній лаві. Фотоелемент повинен бути захищений від стороннього світла для запобігання додатковим похибкам при вимірюванні. Для цього використовують тубус з декількома внутрішніми перегородками у вигляді кілець, які повинні запобігти виникненню впливу похибок від розсіяного світла. Вся поверхня тубуса повинна бути пофарбована чорною матовою фарбою.

Щоб зрівняти відому силу світла одного джерела з невідомою силою світла іншого джерела, можна користуватися різними прийомами, але всі вони базуються на вимірі реакції приймача на потік випромінювання від джерел світла. Загальна схема вимірювання наступна. По обидві сторони фотометричної лавки встановлюють лампи.

Передбачається можливість їх пересування на каретках. Встановлюють світлозахисні екрани й щити, які захищають фотоелемент від попадання на нього світла від інших джерел, відбитого й розсіяного світла. Між лампами на каретці фотометричної лавки кріпиться приймач випромінювання, з пристроєм, який при попаданні на приймач випромінювання світла покаже значення реакції приймача  $i_\phi$  (як правило, це гальванометр).

Виведення розрахункової формули при необхідності дають через чутливість приймача.

Компенсаційний спосіб полягає в тому, що фотоелемент, розташований на каретці між джерелами випромінювання, по черзі повертається до кожного з них. Пересуванням каретки з фотоелементом добиваються однакового рівня освітленості на світлочутливій поверхні фотоелемента, а саме рівних значень реакції приймача на освітленість (наприклад, фотострум). Вимірявши відстані між лампами ( $l_1$  і  $l_2$ ) проводять розрахунок сили світла за формулою:

$$I_1 = I_2 \frac{\ell_1^2}{\ell_2^2}.$$

Спосіб пропорційних відхилень. Цей спосіб, як правило, застосовується при скороченій фотометричній лавці (рис. 3.8). З одного боку лавки закріплюється нерухомо приймач випромінювання, з другого по черзі розташовують джерела, одне з яких є досліджуваним, а друге робочим еталоном. Відстані повинні залишатися постійними. Заміряють значення фотоструму при освітленні одним і другим випромінювачем. Розрахунок проводять за формулою:

$$I_2 = I_1 n_2 / n_1. \quad (1.7)$$

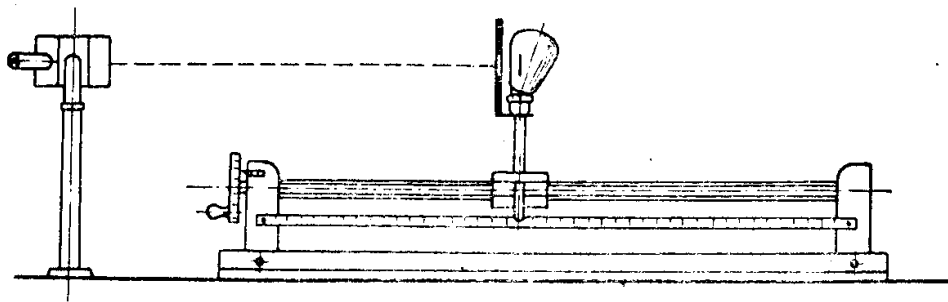


Рисунок 3.8 – Схема вимірювання сили світла джерела випромінювання на односторонній фотометричній лаві фотоелектричним методом

При використанні цього способу слід перевірити таку характеристику приймача, як його лінійність для всього діапазону вимірювання. У разі відхилення характеристики від вищезазначеного, цим способом користуватися не слід.

**Нульовий спосіб.** Це спосіб, при якому використовують два приймачі випромінювання. У ланцюзі приймача при різних рівнях освітленості виникає різний фотострум. Змінюючи відстані між приймачами й лампами простим пересуванням каретки з фотоелементом по лавці, добиваються нульових показників пристрою. Виконують відлік відстаней і розраховують за відомою формулою. Цей спосіб дає змогу швидко й досить точно перевірити значення сили світла великої кількості ламп.

При його використанні слід особливу увагу приділити підбору фотоелементів, їх чутливість повинна бути однаковою на однакові світлові потоки. Для цього рекомендується проводити періодичну перевірку характеристик приймачів.

## ТЕМА 4 ПРИЙМАЧІ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Зусилля фізиків вже давно були направлені на те, щоб проводити світлові виміри без копіткої роботи ока людини шляхом застосування особливих пристроїв. При використанні таких фізичних пристроїв для світлових вимірів участь ока зводиться до спостереження за їх показниками.

Однією з причин, що спонукала людство застосовувати об'єктивну фотометрію, є особливості ока людини – неоднаковість його властивості у різних спостерігачів, зміна властивостей в одного й того ж спостерігача залежно від різних обставин – недостатня яскравість, недостатня якісна порогова чутливість тощо.

Робота з фізичними приймачами оптичного випромінення значно простіша ніж зорові дослідження, які потребують від спостерігача знань, вмінь та навичок. Крім того вони розширюють межі вимірювання від ІЧ до УФ області спектра, що недоступне суб'єктивним методам вимірювання.

Приймачами оптичного випромінення (далі – приймачі) називаються пристрої, які перетворюють енергію оптичної області спектра в інші види енергії. Існують різні типи приймачів залежно від типу енергії, в яку вони перетворюють енергію оптичної області спектра: біологічні, хімічні, електричні тощо.

У фотометричній практиці віддають перевагу використанню приймачів, які перетворюють енергію оптичної області спектра в електричну енергію як найбільш зручну для вимірювання. Різноманітність фізичних приймачів значна, але при світлових вимірах використовуються не всі, а тільки ті, спектральна чутливість яких близька до спектральної чутливості ока людини. У цьому разі можна говорити про світлові відчуття спостерігача, який довіряє кількісну оцінку цих почуттів пристроям.

При освітленні речовини потік випромінення може поглинатися в ньому двома способами:

– кристалевою решіткою матеріалу, перетворюючись в теплову енергію решітки, що призводить до нагріву тіла без порушення термодинамічної рівноваги. Різні види зміни електричних властивостей твердого тіла в результаті зміни його температури називають термоелектрчними явищами ;

– - електронами твердого тіла, при цьому тіло переходить у збуджений нерівноважний стан, температура тіла, тобто енергія кристалевої решітки практично не змінюється, а середня енергія електронів збільшується. Зміна електричних властивостей речовини при його освітленні в результаті оптичного збудження електронів називається фотоелектричними явищами.

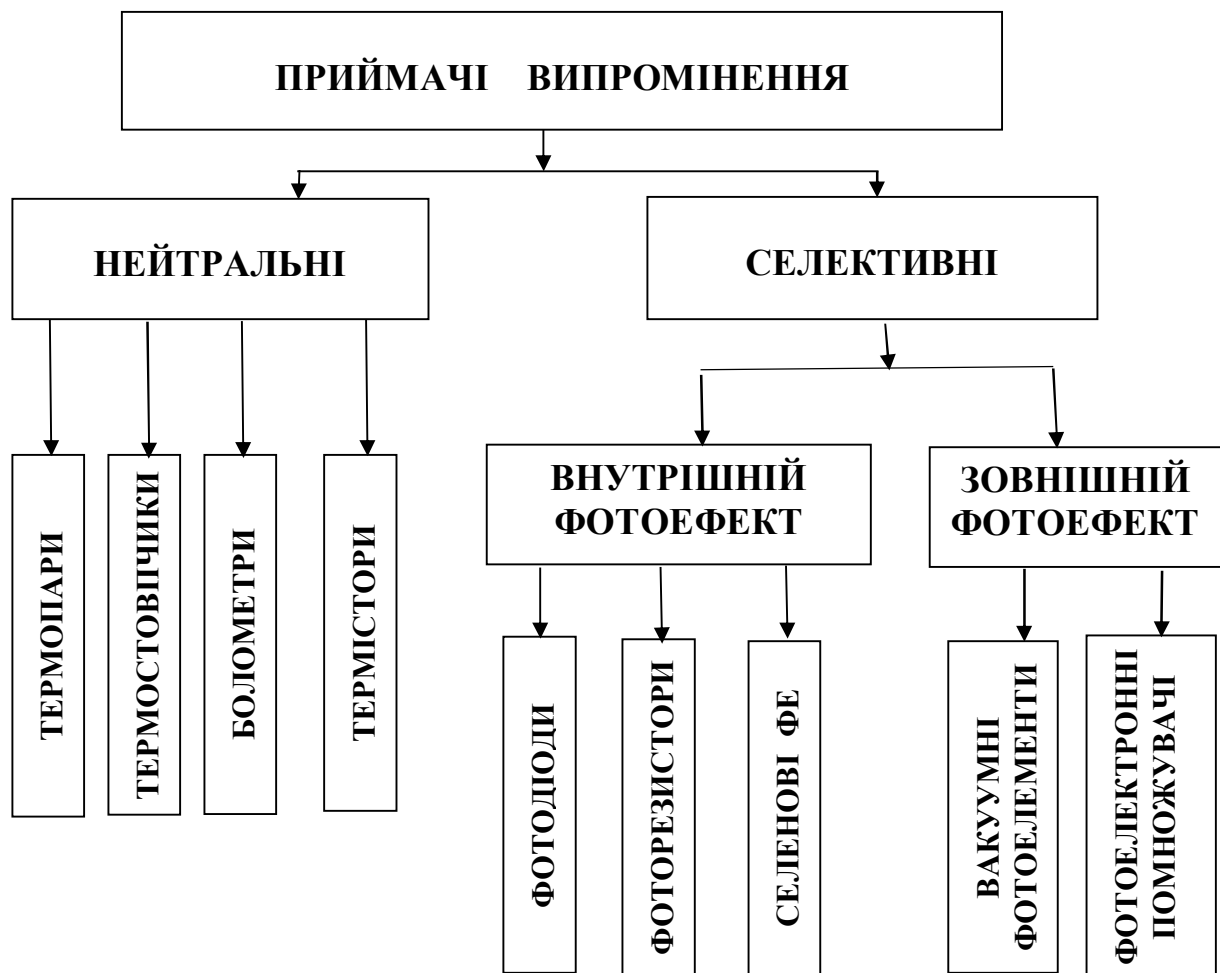


Рисунок 4.1 – Приймачі випромінення

Приймачі випромінення, в яких використовуються термоелектричні явища, називаються тепловими приймачами випромінювання (термопари, термостовпчики тощо).



Приймачі випромінення, в яких використовуються різні фотоелектричні явища, називаються фотоелектронними.

З точки зору практики світлових вимірювань, приймачі випромінювання зручно класифікувати на дві групи: селективні (вибіркові) й неселективні (нейтральні).

Основною характеристикою приймача будь-якого типу є його чутливість, що визначається як відношення реакції приймача на потік випромінювання до значення цього потоку випромінювання:

$$S = \frac{r}{\Phi}. \quad (4.1)$$

Зручно класифікувати приймачі так, як показано на рисунку 4.1.

У селективних приймачів чутливість залежить від довжини хвилі випромінення і має своєрідну форму спектральної чутливості – різну в різних частинах спектру

$$S_{\lambda} = \frac{r_{\lambda}}{\Phi_{\lambda}} \quad (4.2)$$

Неселективні приймачі однаково реагують на рівні потужності випромінювання, що на них падають незалежно від частини спектра.

Прикладом нейтральної дії випромінювання може бути однакове нагрівання чорної поверхні при попаданні на неї рівних потоків випромінювання в різних частинах спектра. У більшості всі приймачі є селективними.

Проблемою є створення нейтральних приймачів. Всі неселективні приймачі створюють за принципом перетворення тепла випромінення, для чого використовують спеціальні чорнителі. Для збільшення нейтральності використовують моделі чорного тіла, що являють собою порожнечі з малим отвором і доброю теплоізоляцією.

Неселективні приймачі мають перевагу перед селективними в тому відношенні, що їх спектральна чутливість має повну визначеність.

При розподілі приймачів на селективні й нейтральні слід враховувати той факт, що нейтральні приймачі не обов'язково будуть такими у всіх областях спектра випромінення. Наприклад, приймачі, які є неселективними для світлової енергії, можуть бути селективними в сусідніх областях спектра.

Серед найбільш важливих характеристик приймачів випромінення слід особливо виділити:

- інтегральну чутливість (для неселективних приймачів);
- спектральну чутливість;
- відносну спектральну чутливість ( для селективних приймачів);
- лінійність;
- інерційність;
- темновий струм;
- робоча напруга живлення;
- та ін. залежно від принципу дії приймача.

#### **4.1 Нейтральні приймачі випромінення**

Реакція нейтральних приймачів випромінення заснована на нагріві, що виникає при поглинанні випромінення, яке на них падає. Тому збільшення їх чутливості пов'язано з тенденцією збільшення нагріву приймача за рахунок поглинання якомога більшої частини потоку. Для створення неселективних приймачів використовують спеціальні чорнителі (окис платини, чернь цинкова, копоть скипидару і камфори), що забезпечують високий коефіцієнт поглинання. Так, цинкова чернь в деяких інтервалах інфрачервоного випромінення забезпечує коефіцієнт поглинання  $\alpha = 0,96 - 0,98$ .

Всі нейтральні приймачі мають чорну поверхню, яка здатна поглинати як видиме, так і невидиме випромінення.

Крім того, на підвищення чутливості нейтрального приймача впливає характер теплоємності. Необхідно, щоб теплоємність була по можливості малою, а підвищення температури, яке є наслідком поглинання енергії випромінення, по можливості великим.

Суттєвим фактором також є втрата тепла, які виникають разом з підвищенням температури приймача по відношенню до температури навколишнього середовища. Ці втрати пов'язані із світимістю, теплопровідністю та конвекцією. Для зменшення втрат, пов'язаних з теплопровідністю, зачорнена металева пластина приймача прикріплюється до корпусу за допомогою тонких «містків» з теплоізоляційних матеріалів. Щоб усунути втрати тепла за рахунок конвекції, зачорнену пластину приймача вміщують у вакуумований посуд. У результаті чутливість приймача може збільшитись у сотні разів.

До нейтральних приймачів відносяться: різні болометри, радіометри й термопари.

#### 4.1.1 Термопари

У термоелементах і термопарах використовується явище нагріву одного з двох спаїв різнорідних металевих провідників, які створюють замкнений контур. У цьому контурі з'являється термоЕРС і виникає електричний струм, сила якого пропорційна різності температур між нагрітим і холодним спаєм, величина якої залежить від роду металів, що складають контур термопари. На рисунку 4.2 наведено схему термопари. Загострені кінці (2) проволочок (3) замикаються смужкою пластини (1) у вигляді тонкої фольги, почорнена поверхня якої служить поверхнею приймача. Звичайно спай, що підігрівається, кріпиться на тильній стороні тонкої зачорненої пластини (1), яка разом із спаєм створює чутливий термоелемент. Металевим дзеркалом пучок променів концентрується на зачорненій стороні приймача.

Електричний струм, що при цьому виникає можна виміряти за допомогою чутливого гальванометра.

Для виміру потужності вузького монохроматичного пучка, що виходить із щілини спектрального пристрою, чутливій поверхні термоелемента надається форма вузького прямокутника (наприклад, розміром  $1 \times 10$  мм).

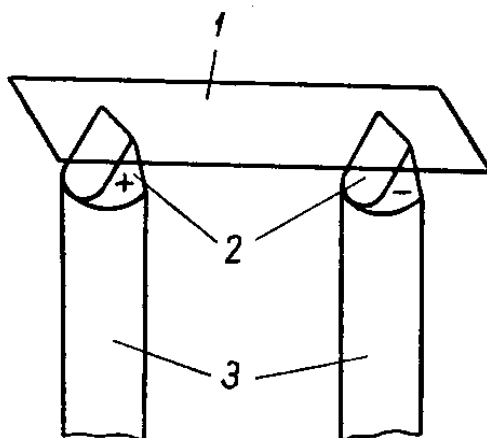


Рисунок 4.2 – Схема устрою термопары

Довідкові дані про термоЕРС деяких термопар при нагріві їх на 1 градус порівняно з температурою холодних кінців наведені в таблиці 4.1.

Таблица 4.1 – Довідкові дані деяких термопар

Тип термопары	Температурний інтервал вимірювання	Значення термоЕРС (мкВ/градусів С)
Мідь-константан	0–20°	39,5
Залізо-константан	0–20°	52,5
Хромель-копель	0–100°	71,3
Манганин-константан	0–100°	43,0
Висмут-срібло	0–100°	80,2

Термопары, з'єднані послідовно у ряд дають значення чутливості, яка дорівнює сумі чутливостей окремих термопар. Такий пристрій має назву термостовпчика.

#### 4.1.2 Термостовпчики

Улаштування термостовпчиків буває різним. На рисунку 4.3 наведено схему конструкції термостовпчика. Він звичайно монтується у пластмасовий корпус 6 на металевому кронштейні, що забезпечує легке кріплення на фотометричному обладнанні. Металеve дзеркало фокусує потік випромінення

на приймальні зачорнені робочі поверхні пластин, які кріпляться до ряду послідовно з'єднаних спаїв термопар. Дзеркало може пересуватися у горизонтальній площині, змінюючи при цьому площу робочої поверхні термостовпчика, що забезпечує зміну його чутливості.

Термостовпчики застосовуються для потреб світлових вимірів частіше за інших неселективних приймачів із-за простоти їх використання. Вони добре вивчені і в багатьох випадках мають достатню чутливість. Після фотоелементів термостовпчики знаходяться на другому місці по частоті використання.

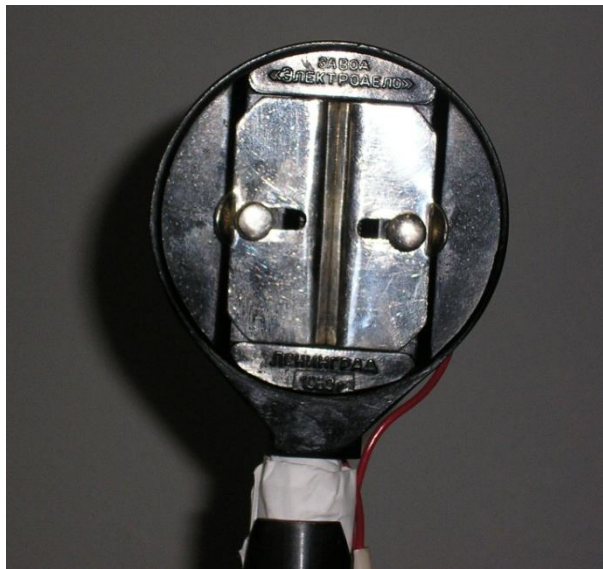


Рисунок 4.3 – Загальний вигляд термостовбчика

#### 4.1.3 Болometri

Болометром називається пристрій для виміру потоку випромінення, поглинання якого змінює електричний опір нейтрального приймача.

Опір багатьох матеріалів залежить від температури. Незначний нагрів, що виникає під дією поглиненого випромінення і пов'язана з ним зміна опору може бути виміряна загальноприйнятими методами. Болometri бувають металеві й напівпровідникові.

Металеві болometri – це тонка смуга металу, нанесеного розпиленням у вакуумі на скляну, кварцову або целюлозну основу. Найчастіше за метал обирається платина. Щоб добитися неселективного поглинання, зверху болومتر покривається чорнителем. Смужка має невеликі розміри: довжина –

1–10 мм, ширина – 0,5–2 мм, товщина шару – близько одного мікрона. Опір смужки знаходиться в межах 10–100 Ом.

Напівпровідникові болометри виготовляють з різних окисних напівпровідників (найчастіше суміші окису марганцю і нікелю, а також кобальту). Шляхом тиску та обжигу отримують смужки на керамічній підложці. Потім проводять почорніння шляхом нанесення шару золота. Напівпровідникові болометри мають опір порядку 1 мОм.

Електрична сема застосування болометра базується на містку Уїтстона і наведена на рисунку 4.4.

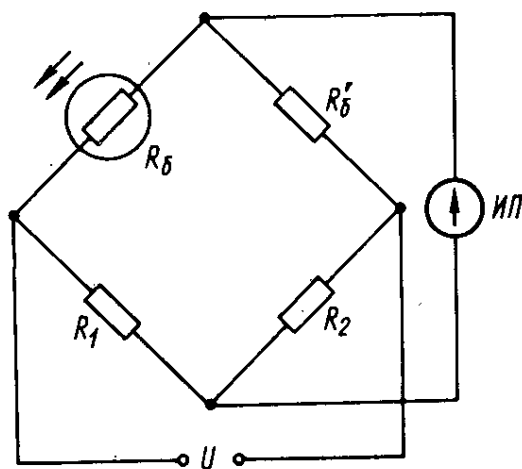


Рисунок 4.4 – Електрична схема застосування болометра

Останнім часом широке впровадження отримав особливий вид болометрів, які відрізняються виготовленням - термістори. Це багатотомні опори з напівпровідників (суміші окислів нікелю, кобальту, заліза, цинку, магнію та ін.) При кімнатній температурі їх опір складає  $(2 \div 4) \cdot 10^6$  Ом, що дає змогу застосовувати їх в електронних підсилювачах. При збільшенні температури на 1 градус опір зменшується в десятки разів.

Термістори можуть виготовлятися дуже малого розміру, тому інерція показань у них значно менша, ніж у теплових приймачів. Вони широко застосовуються при спектральних вимірах в інфрачервоній області спектра.

## 4.2 Селективні приймачі випромінення

Фотоелектронні пристрої, вихідний сигнал яких залежить не тільки від потужності, але й довжини хвилі випромінення, називаються селективними.

Слід зазначити, що робота всіх селективних приймачів випромінення заснована на принципі фотоефекта.

Фотоефектом називається явище випускання з поверхні металу під дією світла заряджених часток – електронів.

Закони фотоефекта:

- 1) число фотоелектронів, які визволені світлом за одну секунду, прямо пропорційне числу поглинутих за той же час фотонів;
- 2) кінетична енергія фотоелектронів прямо пропорційна енергії фотонів, поглинутих катодом.

Пристрій, робота якого заснована на явищі фотоефекта, називається фотоелементом.

Фотоелектричні явища (фотоефект), що складають основу дії фотоелектричних приймачів, можна розділити на два види:

- 1) зовнішній фотоефект, або електронна емісія, яка являє собою випускання освітленим тілом вільних електронів у вакуум або газ за рахунок поглинання фотонів. Вільні електрони можуть збиратися на аноді, фокусуватися або прискорюватися електричним полем.
- 2) внутрішній фотоефект полягає в переході електронів в об'ємі освітленого тіла в збуджений стан (на більш високі енергетичні рівні) без зміни нейтральності твердого тіла (без виходу електронів за його межі).

Фотоелектронні приймачі випромінення (селективні приймачі) відрізняються від термоіндикаторів (нейтральні приймачі) більш високою чутливістю, здатністю виявляти світлові потоки меншої інтенсивності, мають значно меншу інерцію.

#### 4.2.1 Вакуумні фотоелементи

В основу дії вакуумного фотоелемента покладено зовнішній фотоэффект, під яким розуміють вихід електронів з поверхні речовини у вакуум або газ за рахунок енергії фотонів.

Дослідження показали, що з чистої поверхні металу вилітають електрони тільки під дією фіолетових і ультрафіолетових променів. Потік електронів, визволених під дією світла одним з електродів вакуумного пристрою та вловлювання цього потоку другим електродом, створює у зовнішньому ланцюгу струм, який називається фотострумом.

Вакуумний елемент являє собою вакуумну оболонку, яка виконується із скла або іншого прозорого матеріалу, в середині якого розташовуються анод і катод (рис. 4.5).

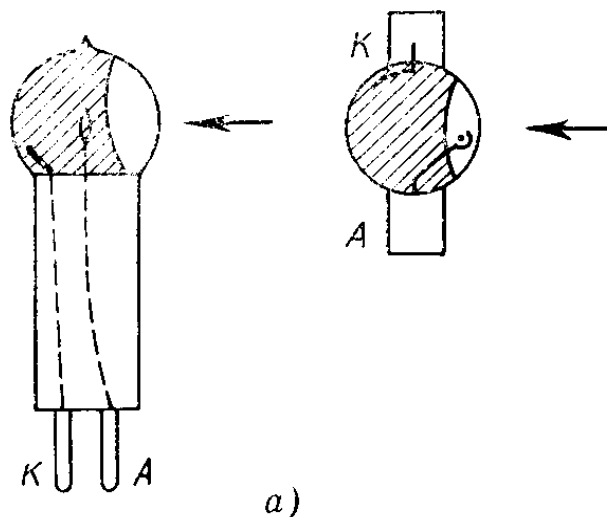


Рисунок 4.5 – Схема будови вакуумного фотоелемента

У вакуумних фотоелементах визволені випроміненням з фотокатода електрони направляються до аноду під дією прикладеної до нього напруги. Напруга вибирається такою, що б всі електрони попали на анод. Фотоелемент працює в режимі насичення вольт-амперної характеристики.

Схема включення вакуумного фотоелемента з охоронним кільцем наведена на рисунку 4.6.



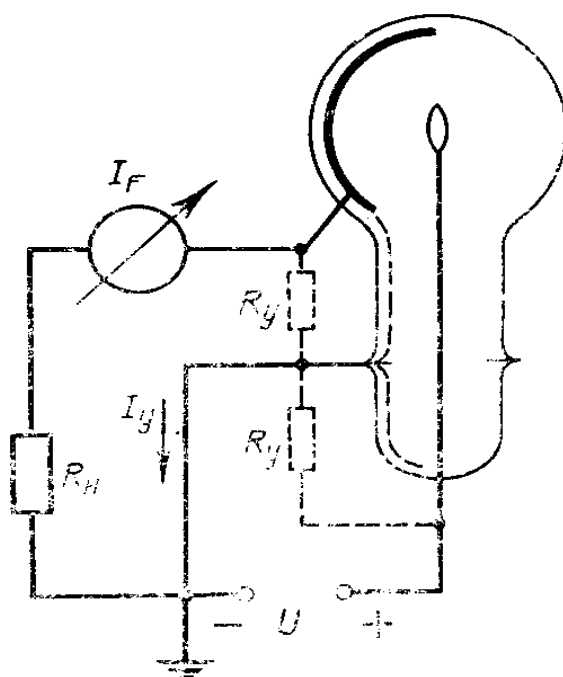


Рисунок 4.6 – Схема включення вакуумного фотоелемента з охоронним кільцем

Спектральна чутливість вакуумного фотоелемента та його інтегральна чутливість визначається типом катода. На рисунку 4.7 наведені криві відносних спектральних чутливостей фотоелементів з різними типами фотокатодів.

Фотокатод являє собою шар металу або напівпровідника, нанесений безпосередньо на скло колби або на спеціальну основу – звичайно металеву пластину. Робота виходу, яка необхідна для звільнення електронів з чистого металу, велика. Тому фотокатоди з чистого металу застосовують тільки в приладах для роботи в ультрафіолетовій області спектра («сліпі» фотокатоди з магнію). Найчастіше фотокатоди являють собою складні комбінації з декількох речовин. Так, для видимої області спектра застосовують катодаи із сурми, оброблені парами одного або декількома лужними металами, наприклад сурм'яна-цезієвий, багатолужний, вісмут-срібноцезієвий, срібнокисне-цезієвий. Всі фотокатоди, які чутливі у видимій області спектра, також чутливі і до ультрафіолетового випромінювання, але для цього використовуються колби, що мають увіюлеве віконце. Інфрачервона область спектра має значний інтерес

для фотоелектроніки. Фотоелектронні пристрої, які чутливі у найближчій інфрачервоній області спектра, використовують у приладах нічного бачення, астрономії, спектроскопії. Для цієї області спектра може бути застосований фотокатод срібнокіснецеазієвий, але розробки в цьому напрямі ще досі інтенсивно ведуться.

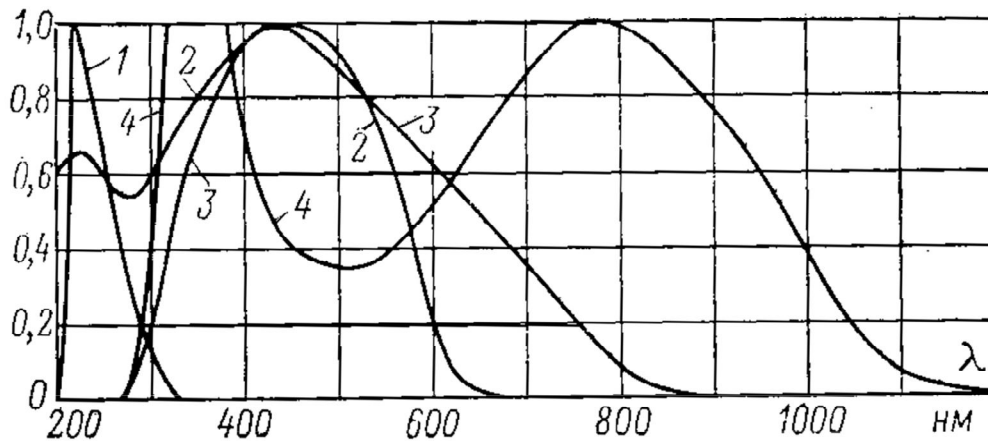


Рисунок 4.7 – Криві відносних спектральних чутливостей деяких фотокатодів:

1 – магнісвий (з увіолієвим вікном); 2 – сурмяно – цезієвий (з кварцевим вікном); 3 – багатолужний; 4 – кісне-срібляно-цезієвий

Фотокатооди для вакуумного фотоелемента (ВФЕ) можуть бути виконані двома засобами: для роботи «на відбиття», коли світло падає на фотокатод з боку вакууму (масивні фотокатооди) і для роботи «на просвіт», коли світло поступає з боку прозорої оболонки.

ВФЕ з масивними непрозорими фотокатодами використовують як приймачі сфокусованих світлових потоків, постійних або модульованих за амплітудою у діапазоні невеликих частот (звукове кіно, фототелеграфія, контрольно – вимірювальні прилади). Основна вимога до цих фотоелементів – достатньо висока інтегральна чутливість, стабільність, надійність роботи і взаємозамінність. Серійні фотоелементи цієї групи мають сферичну форму колби з фотокатодом, нанесеним на її внутрішню поверхню і освітлюваним через залишену прозорою частину колби. Від геометричної форми колби

залежить ефективність використання світлового потоку, що падає. Для масивних фотокатодів сферична форма фотокатода, освітлена з внутрішньої сторони, є оптимальною: відбита від поверхні фотокатода частина світлового потоку падає на сусідні ділянки вгнутої сфери і знову поглинається катодом.

Анод сферичних фотоелементів виконують у вигляді кільця або петлі з тонкої проволочки і розміщують у центрі колби.

При виготовленні напівпрозорих срібноокисневоцезієвих фотокатодів склад наносять на скло методом термічного випарювання, такі фотоелементи працюють на просвіт.

До найбільш значущих характеристик вакуумних фотоелементів слід віднести **лінійність** – пропорційну залежність між фотострумом, що виникає в ланцюзі фотоелемента, і потоком випромінювання, що падає на його прийомну поверхню. Вакуумні фотоелементи мають значно більшу лінійність, ніж інші приймачі.

Найважливішою якістю вакуумного фотоелемента як вимірювального пристрою крім вищезазначеного параметра «лінійність» є **стабільність** його параметрів. Під стабільністю розуміють постійність значення спектральної чутливості протягом часу й зміни температури навколишнього середовища.

Одним з проявів нестабільності є «**стомлюваність**» – зворотна зміна чутливості. При фотоелектричних вимірах, що виконуються за допомогою вакуумних фотоелементів, часто доводиться спостерігати явище, яке має назву «стомлюваність» катода. Суть цього явища полягає в тому, що при незмінному потоці випромінювання, який падає на катод, і незмінних інших зовнішніх умовах фотострум, який виникає у замкнутому ланцюзі, починає повільно зменшуватися. Згодом в ланцюзі встановлюється постійне значення фотоструму. З цього часу можна проводити вимірювання.

Слід зазначити, що стомлюваність фотокатода залежить від складу випромінювання, яке падає. При монохроматичному випромінюванні найбільша стомлюваність відзначається в короткохвильовій частині спектра, найменша – в червоній і інфрачервоній областях. Якщо стомлюваність фотокатода значна, то

в процесі освітленості може змінюватися і його спектральна чутливість. Такі фотоелементи, як правило, вважають неприйнятними для проведення експериментів. Тому для виконання світлових вимірів слід обирати фотоелементи, які мають малу стомлюваність.

При роботі фотоелемента крім фотоструму в ланцюзі протікає струм, що має назву **темновий**, який не зникає при припиненні освітленості. Він виникає за рахунок струму втечі по цоколю і колбі, а також за рахунок термоелектронної емісії. Темновий струм перешкоджає вимірам і його по можливості зменшують. У деяких конструкціях вакуумних фотоелементів, які служать для виміру слабких потоків, є третій допоміжний електрод – охоронне кільце, розташоване таким чином, щоб уловлювати струм втечі по балону між выводами катода і анода. У вакуумних фотоелементах з охоронним кільцем струм втечі практично відсутній. Струм термоелектронної емісії можна зменшити охолодженням фотоелемента.

При роботі з вакуумними фотоелементами слід пам'ятати, що кожен з них виготовляється індивідуально за технологією, що включає в себе послідовне нанесення на катод шарів різних хімічних елементів. Така технологія обумовлює індивідуальні властивості кожного з виготовлених фотоелементів.

Крім вакуумних фотоелементів у техніці використовують газонаповнені фотоелементи, які наповнені інертним газом, наприклад аргоном. Такі елементи мають більшу інтегральну чутливість, ніж вакуумні, але малу стабільність, нижчу лінійність і більшу інерцію, що є суттєвим при роботі на високих частотах.

Основними паспортними даними для кожного типу фотоелемента є:

1. Тип фотокатода і спектральний діапазон роботи фотоелемента.
2. Чутливість – інтегральна або спектральна.
3. Рекомендована анодна напруга, що забезпечує насиченість у широкому інтервалі світлових потоків.

4. Допустимий інтервал зміни температури навколишнього середовища, в межах якого зберігається чутливість фотоелемента. Зазвичай інтервал зміни температури складає  $-20^{\circ} \div +50^{\circ}\text{C}$ .

5. Величина темнового струму.

#### 4.2.2 Фотоелектронні помножувачі

Найбільш зручним пристроєм для роботи з малими потоками випромінювання є фотоелектронні помножувачі (далі – ФЕП). У цих пристроях фотоелектрони направляються прискорювальною напругою до системи послідовних вторинних емітерів або динодів.

На кожному каскаді один падаючий на динод первинний електрон вибиває з нього декілька вторинних електронів. Підсумкове посилення сягає  $10^5 \div 10^9$  разів. На рисунку 4.8 наведена принципова схема ФЕП.

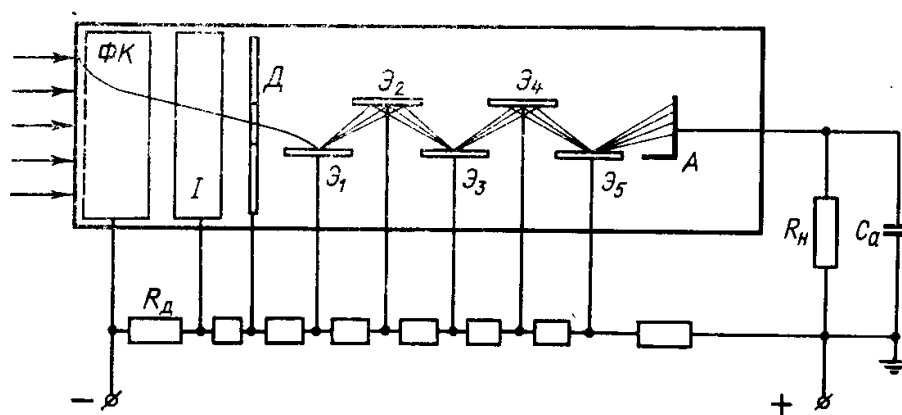


Рисунок 4.8 – Принципова схема ФЕП з подільником напруги:

ФК – фотокатод; І - фокусуючий електрод; Д – діафрагма;  $E_1 \dots E_2$  – діноди;

А – анод;  $C_a$  – ємність анода;  $R_d$  – навантаження подільника напруги;

$R_n$  – навантажувальний опір в ланцюзі анода

Випромінювання, що падає на фотокатод, викликає фотоелектронну емісію. Кількість електронів, емітованих в одиницю часу фотокатодом, пропорційна інтенсивності потоку випромінювання. Електрони залишають фотокатод під різними кутами до його поверхні й з різною початковою швидкістю. Для того, щоб зібрати їх на першому диноді, площа якого може бути значно меншою ніж

площа фотокатода, необхідні фокусуючі електронно-оптичні системи, що складаються з ряду електродів, які утворюють електростатичні лінзи. Простір між фотокатодом і первинним динодом називається вхідною камерою ФЕП. У ній здійснюється фокусування і прискорення фотоелектронів, що направляються на перший динод.

Якість електронно-оптичної системи вхідної камери характеризується коефіцієнтом збору електронів, який являє собою відношення числа фотоелектронів, що надійшли до першого диноду, до загальної кількості емітованих фотокатодом електронів.

Фотоелектрони, що надійшли на перший динод, викликають вторинну електронну емісію. Кількість вторинних електронів, які залишили перший динод, дорівнює  $n_k \gamma_k \sigma_k$ , де  $\sigma$  – коефіцієнт вторинної емісії, який залежить від матеріалу, з якого виготовлений динод, та напруги в ланцюгу фотокатод-первинний динод. Напруга на диноди і електроди ФЕП подається такою, щоб між кожною парою динодів створювалось електричне поле. Форма динодів і їх взаємне розташування обираються таким чином, щоб забезпечити можливість збору найбільшого числа електронів з попереднього динода на наступний. Матеріал для виготовлення динодів повинен мати високий коефіцієнт вторинної емісії при невеликих енергіях первинних електронів ( $\sim 1$  ЕВ).

Останнім часом з'явилися каналні ФЕП, в яких система динодів замінена одним розподільчим динодом у вигляді вузького каналу, покритого напівпровідниковим шаром з високим коефіцієнтом вторинної емісії. Упродовж шару напівпровідника розподіляється прискорювальна напруга. Посилення таких пристроїв дещо менше ніж у ФЕП, але вони мають значно менші габарити і вищу міцність.

#### 4.2.3 Фоторезистори

Фоторезистори – селективні приймачі випромінювання, робота яких заснована на явищі внутрішнього фотоефекта, який полягає в перерозподілі електронів по енергетичних рівнях за рахунок поглинання кванта

випромінення. При цьому зростає концентрація носіїв струму усередині речовини і з'являється додаткова провідність - фотопровідність. Поглинання квантів випромінення може проходити як в основній речовині – власний фотоефект, так і в суміші – сумісний фотоефект.

При власному фотоефекті в зоні провідності з'являються електрони, а у валентній зоні – дірки, при цьому фотопровідність має біполярний характер.

При сумісному фотоефекті електрони переходять або з рівня суміші в зону провідності, при цьому з'являється електронна провідність (  $n$  - провідність), або з валентної зони на рівні суміші – діркова провідність (  $p$  - провідність).

Зміна концентрації носіїв заряду в речовині при його освітленні призводить до зміни його електричних властивостей і називається внутрішнім фотоефектом.

При внутрішньому фотоефекті оптично збуджені електрони залишаються всередині освітленого тіла, нейтральність якого не порушується.

Внутрішній фотоефект можна виявити за зміною електропровідності тіла при його освітленості. Це явище називається **фотопровідністю**.

Напівпровідникові пристрої, дія яких основана на явищі фотопровідності називаються фоторезисторами.

Фоторезистори звичайно вмикають в ланцюг постійного або змінного струму послідовно з опором навантаження (рис. 4.9).

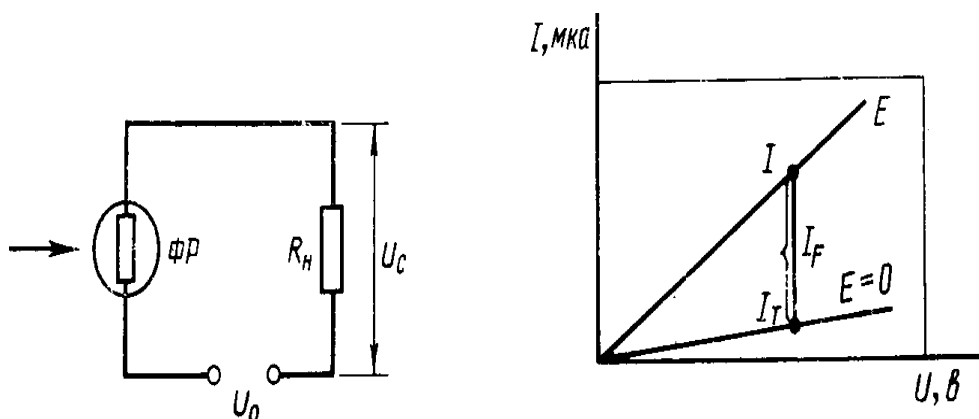


Рисунок 4.9 – Схема включення фоторезистора

Основними речовинами, які використовують для виготовлення промислових фоторезисторів, є сульфід або селенід кадмію.

Фоторезистор – дуже розповсюджений приймач випромінювання, являє собою напівпровідник, високий електричний опір якого самотно знижується під дією падаючого на нього випромінювання.

Темновий струм фоторезистора досить малий, тому що в об'ємі неосвітленого напівпровідника присутня досить мала кількість вільних електронів, здатних рухатися під дією прикладеної до нього зовнішньої напруги.

Будову фоторезистора наведено на рисунку 4.10.

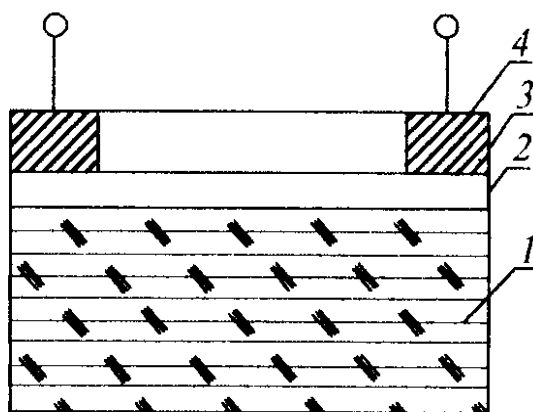


Рисунок 4.10 – Схема будови фоторезистора

Фоторезистор виготовляють наступним чином. На основу (1), виконану із слюди або скла, наносяться шар напівпровідника (2), на якому розміщені контакти (3) для подачі напруги. Фоторезистор розміщується в металевому або пластмасовому корпусі (4) з вікном з матеріалу, який є прозорим для випромінювання робочого діапазону фоторезистора.

Виникаючий фотоефект суттєво залежить від довжини хвилі випромінювання і показника поглинання. Якщо випромінювання зовсім не поглинається напівпровідником, то внутрішній фотоефект і фотопровідність не з'являються. Якщо випромінювання поглинається досить сильно, то процес, який протікає у шарі напівпровідника, також не створює достатньої фотопровідності, яка може



бути виміряна чутливими пристроями. Це обумовлено надто високим опором тонкого шару.

На рисунку 4.11 наведено типові спектральні характеристики різних видів фоторезисторів із сульфіду кадмію.

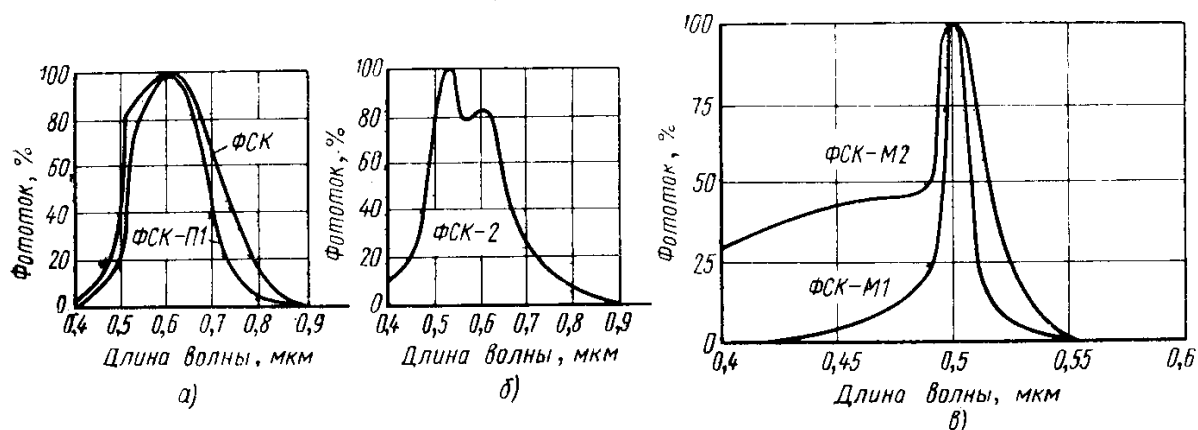


Рисунок 4.11 – Типові спектральні характеристики фоторезисторів

Фоторезистори як приймачі випромінення мають широкий спектральний діапазон, високу інтегральну чутливість, невисоку напругу живлення, малі розміри й масу.

#### 4.2.4 Фотодіоди

Фотодіодами називають напівпровідникові пристрої, які працюють на внутрішньому фотоелекті, використовують односторонню провідність  $p-n$  – переходу, при освітленні якого з'являється ЕРС – фотогальванічний (ФГ) режим або (при наявності живлення) змінюється значення зворотного струму – фотодіодний режим ( далі - ФД).

При роботі фотодіода у фотогальванічному режимі в разі освітлення  $n$  – області в ній з'являються нові носії заряду – електрони й дірки. Вони дифундують до  $p-n$  – переходу, де неосновні носії – дірки переходять в  $p$  – область (зворотній струм неосновних носіїв), а електрони, для яких дифузне поле  $p-n$  – переходу є запираючим, залишаються у  $n$  – області. При постійному освітленні в  $p$  – області накопичуються дірки, а в  $n$  – області – електрони. Це призводить до появи фото ЕРС, поле якої направлене проти поля

дифузії в р – n - переході. Фото ЕРС знижує односторонню провідність р – n – переходу, що збільшує прямий струм основних носіїв.

При роботі фотодіода у фотодіодному режимі до нього прикладається зворотна напруга. У такому разі за відсутності освітленості через р – n – перехід і опор навантаження тече зворотній струм. При освітленості n – області через р – n – перехід і опорне навантаження тече додатковий струм неосновних носіїв. Сумарний струм у ланцюзі складається із темного струму й струму неосновних носіїв.

На рисунку 4.12 наведені схеми включення фотодіодів у фотогальванічному й фотодіодному режимах.

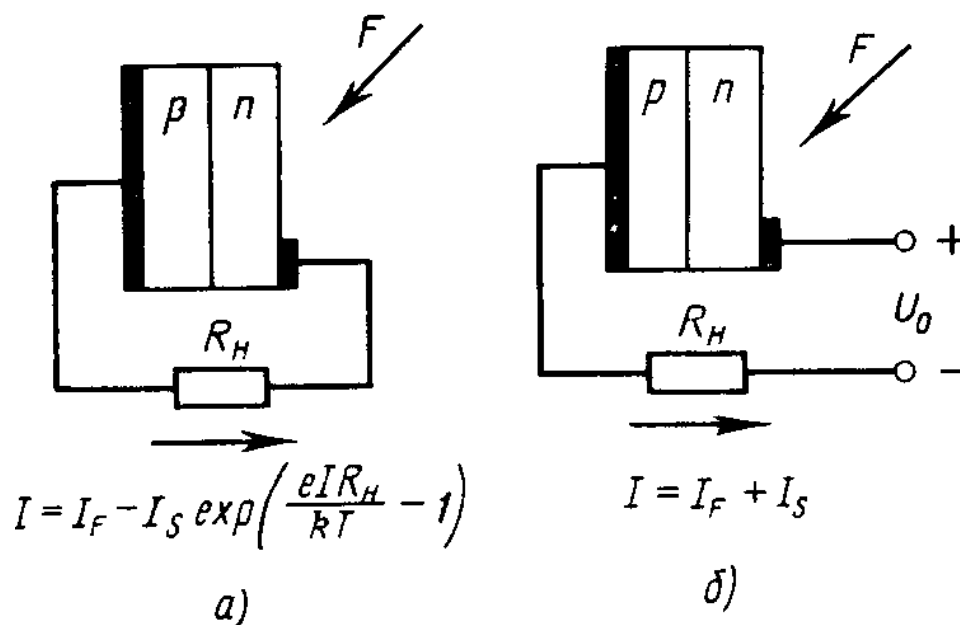


Рисунок 4.12 – Схеми включення фотодіода:

а – фотогальванічний режим; б - фотодіодний режим

Процес виготовлення фотодіода складається з нанесення на металеву основу, яка є одним з електродів, шару напівпровідника, що створює запірний шар. Поверх нього розпиленням у вакуумі наносять шар металу, і закріплюють шайбою для покращення контакту. Вся конструкція розміщується в корпусі.

На рисунку 4.13 показано конструкцію германієвого фотодіоду типу ФД-3, а на рисунку 4.14 порівняльні спектральні характеристики германієвого і кремнієвого фотодіодів.

Крім чутливості параметрами, що характеризують властивості фотодіодів, є:

1. Максимальна робоча напруга, величина якої обмежується напругою пробою.
2. Величина темнового струму, величина якого визначається концентрацією неосновних носіїв заряду в матеріалі і залежить від ширини забороненої зони напівпровідника й температури.
3. Постійна часу (інерційність).

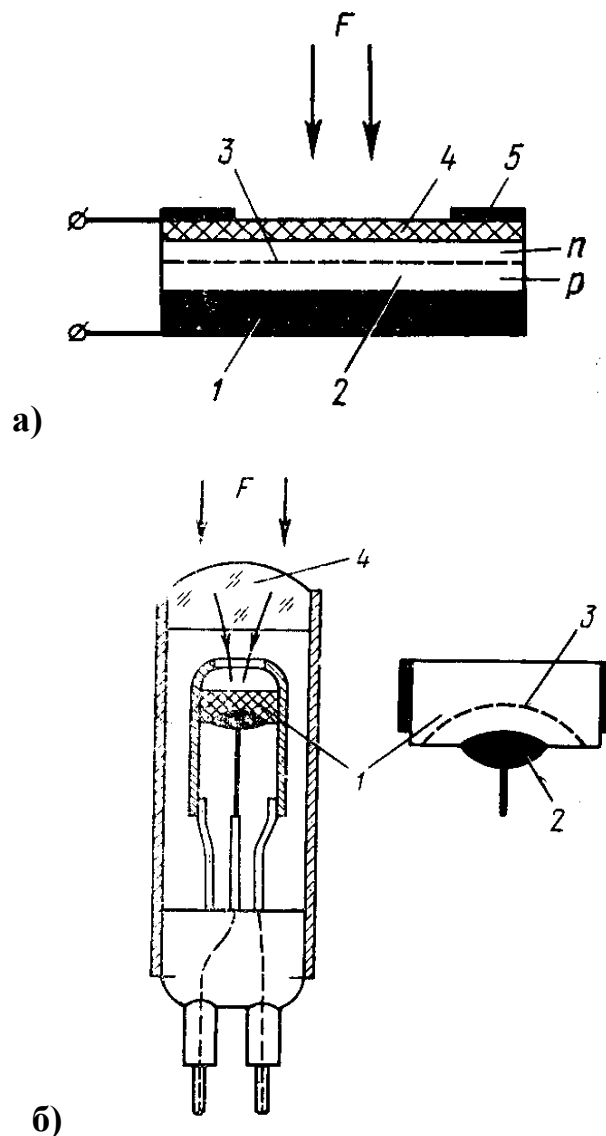


Рисунок 4.13 – Конструкція фотодіода.

- а) схематична будова вентильного фотоелемента: 1 – контактна пластина (підложка); 2 – шар напівпровідника; 3 – р-п перехід; 4 – зовнішній прозорий металевий електрод; 5 – прижимний контактний електрод;
- б) конструкція германієвого фотодіода ФД-3: 1 – платівка монокристалу германія; 2 – металевий електрод; 3 – р-п-перехід; 4 – збираюча лінза

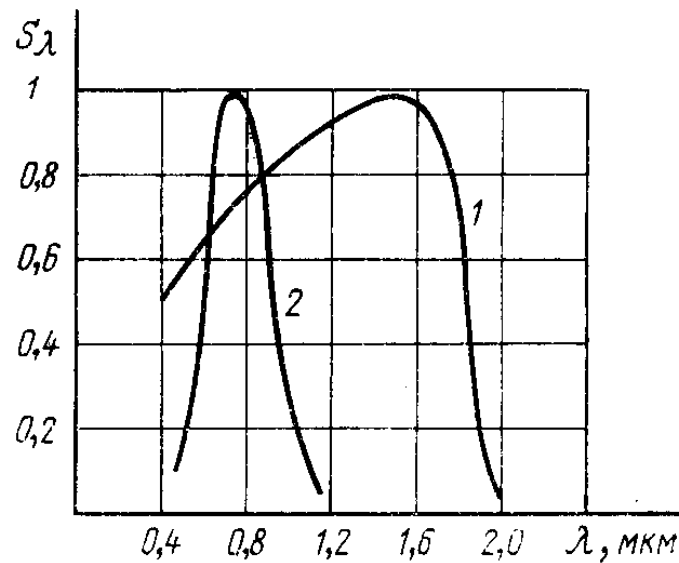


Рисунок 4.14 – Порівняльні спектральні характеристики германієвого 1 і кремнієвого 2 фотодіодів

#### 4.2.5 Селенові фотоелементи

Селенові фотоелементи, або фотоелементи із запираючим шаром є єдиним типом фотоелектричних приймачів, які заслуговують назву фотоелемента. Тільки вони є пристроями, які безпосередньо перетворюють енергію випромінювання, що падає, на електричний струм без зовнішньої напруги. Запираючий шар з'являється у процесі виготовлення фотоелемента на межі між напівпровідником і металом або між двома різнорідними напівпровідниками. Цей шар пропускає крізь себе визволені світлом електрони і не пропускає позитивні заряди, в результаті чого між різними ділянками фотоелемента з'являється різниця потенціалів, яка зникає разом з припиненням освітленості. Якщо електроди освітленого фотоелемента замкнуті проводом через гальванометр, то в зовнішньому ланцюзі потече струм, сила якого залежить від потоку, що падає на чутливий шар фотоелемента.

У даний час для світлових вимірів найчастіше застосовують селенові фотоелементи, які є найяскравішим представником фотодіодів, що працюють у фотогальванічному режимі (рис. 4.15).

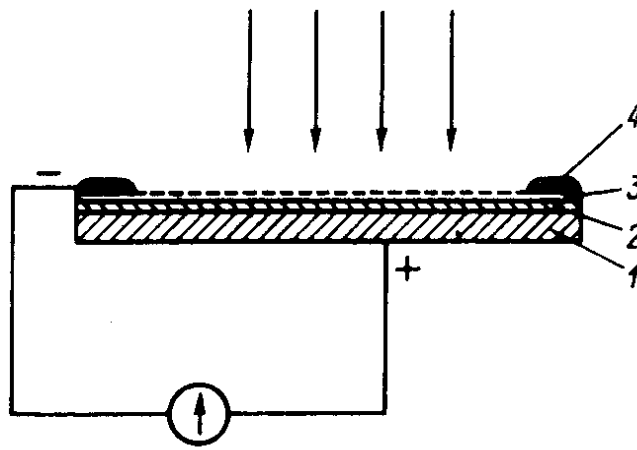


Рисунок 4.15 – Переріз селенового фотоелемента із запірним шаром

Виготовлення селенових фотоелементів полягає в нанесенні шару селену товщиною 1мм методом термічного випарювання у вакуумі на залізну пластину розміром у декілька квадратних сантиметрів. Поверхня пластини попередньо очищується і шліфується для кращого зчеплення із плівкою селену. Нанесена таким способом плівка селену знаходиться у аморфному стані і не має фотоелектричних властивостей. Для того, щоб селен набув кристалеву структуру і став фотоактивним, заготовку прогрівають при температурі  $200^{\circ} - 210^{\circ} \text{ C}$ , близькій до температури плавлення селену. При цьому шар селену переходить в сіру кристалеву модифікацію. Ширина забороненої зони селену при кімнатній температурі дорівнює 2,5 еВ, тип електропровідності – дірковий. Верхній електрод наноситься на поверхню плівки селену методом катодного напилення. Він повинен бути прозорим у всій спектральній області чутливості фотоелемента і мати високу провідність, забезпечуючі контакт із притискною шайбою, яка з'єднується з зовнішньою клемою (другим електродом служить металева підложка, на яку нанесено шар селену). Для зменшення атмосферного впливу фотоелемент покривається плівкою прозорого лаку і монтується в корпус, на якому закріплені клеми виводів. Верхній електрод селенового фотоелемента виготовляють нанесенням у вакуумі тонкого шару кадмію, а потім напівпрозорий шар золота або платини, поверх якого монтується контактне кільце, що є негативним електродом.

Головним достоїнством селенового фотоелемента для світлових вимірів є його висока інтегральна чутливість – близько 500 мкА/лм, характеристика спектральної чутливості, яка приближається до кривої спектральної чутливості ока людини (рис. 4.16).

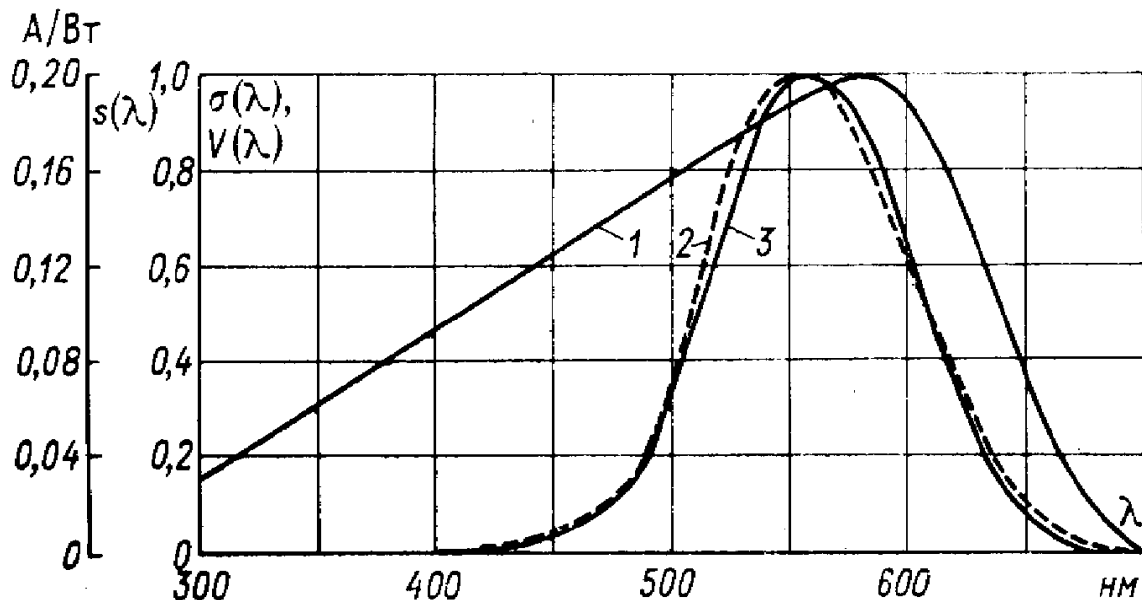


Рисунок 4.16 – Криві спектральної чутливості селенового фотоелемента (1), середнього ока (2) і фотоелемента із коригуючим фільтром (3)

Для того, щоб струм селенового фотоелемента був пропорційним світловому потоку, який падає на його поверхню (лінійність), необхідно, щоб опір зовнішнього ланцюга був меншим ніж внутрішній опір самого фотоелемента. На рисунку 4.17 наведені залежності фотоструму від освітленості селенового фотоелемента при різних опорах навантаження.

При використанні селенових фотоелементів для світлових вимірів слід знати їх особливості:

1. Сила струму зовнішнього ланцюга фотоелемента залежить від спектрального складу випромінювання, що падає.
2. Спектральна чутливість фотоелемента з часом змінюється.

3. Коефіцієнт поглинання залежить від кута падіння потоку випромінювання на поверхню фотоелемента. З ростом кута падіння потоку на поверхню фотоелемента зменшується частка поглинутого потоку.

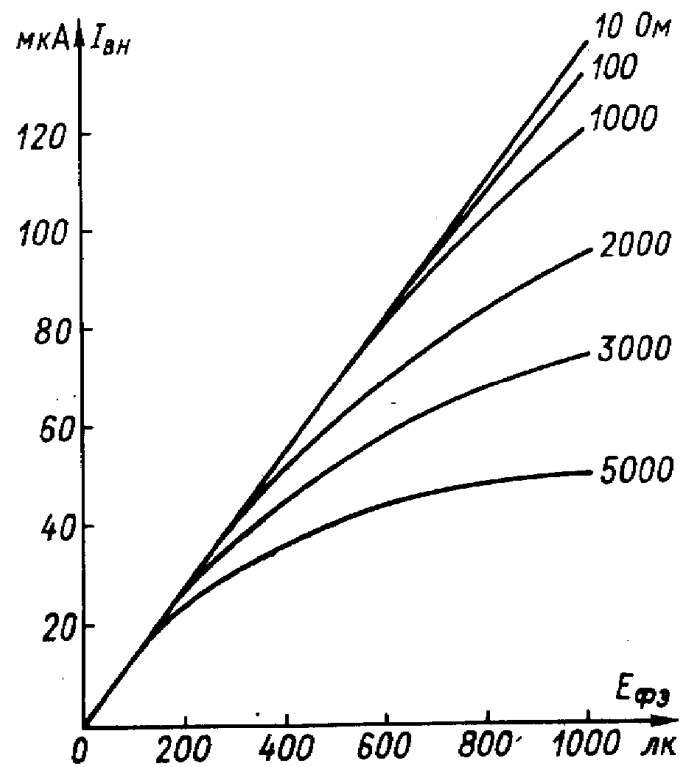


Рисунок 4.17 – Залежність струму селенового фотоелемента ФС-3 від його освітленості

## ТЕМА 5 МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ

Як показує досвід, необхідним елементом найбільш раціонального шляху до визначення цілої низки величин як світлових, так і енергетичних є регулювання світлового потоку випромінення.

Схема будь-якого фотометричного вимірювання обов'язково включає в себе джерело випромінення і приймач. Досить часто в цю схему входить третій елемент, який являє собою пристрій, що дозволяє впливати на величину, яка підлягає вимірюванню, або змінювати її кількісно.

Першим способом зміни величини потоку випромінення слід назвати **спосіб зміни відстані** між джерелом і приймачем випромінення. У всіх випадках, коли застосування закону зворотних квадратів можливе й достатнє, його можна рекомендувати. Застосування вищезазначеного закону може бути обмежено вимогою не дуже великих і не дуже малих відстаней. Дуже великі відстані між джерелом випромінення та приймачем не застосовують через громіздкість установки. Зменшенню відстаней перешкоджає ряд причин. Перша з них, можливо і не сама суттєва, це відхилення від закону зворотних квадратів при відстанях, коли не виконуються точкові умови. Друга і найбільш важлива причина в тому, що при умовах малих відстаней зростає відносна похибка вимірювання відстаней.

Крім того, не завжди можна однозначно визначити площу освітленості фотокатода (особливо для вакуумного фотоелемента) і відстань від нього до джерела. Загальновизнаним рішенням в цьому разі є розміщення перед вакуумним фотоелементом (фотокатодом) діафрагми, площа якої і відстань до джерела визначають тілесний кут випромінення, що падає на приймач. Але якщо чутливість катода по площині є суттєво непостійною величиною, що як правило, має місце, то цей спосіб застосовується тільки за умови, що відстань від діафрагми до джерела випромінення значно більша, ніж від діафрагми до фотокатода.

Всі вищеназвані способи зміни кількісної величини світлового потоку за рахунок зміни відстаней між джерелом випромінення і освітленим об'єктом



дають змогу зменшити (або збільшити) потік випромінення на 1-2 порядки. Для більшої зміни потужності потоку випромінювання застосовують інші методи.

**Нейтральні світлофільтри** або поглинаючі середовища часто застосовують при світлових вимірах для ступеневого вимірювання тієї або іншої величини, щоб розширити межі основного способу плавної зміни величини, яка вимірюється.

Для того, щоб зменшити освітленість поверхні, не змінюючи відстаней від джерела випромінення до освітленої поверхні на шляху проходження променя випромінення вставляють світлофільтр, що поглинає, який ослаблює потік випромінення в таке число разів, яке пропорційне  $\tau$  - коефіцієнту пропускання. Найчастіше при цьому потрібно, щоб поглинаючі середовища були сірими, тобто не змінювали спектральний склад випромінення. До таких поглиначів належать: сірі (димчасті), молочні й матові стекла.

Для посилення поглинання іноді одночасно встановлюють декілька поглиначів. Якщо ці поглинаючі середовища прозорі й сірі (і не поляризують світло), то їхній загальний коефіцієнт пропускання  $\tau$  дорівнює добутку коефіцієнтів пропускання відокремлених фільтрів

$$\tau = \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \dots \tau_n. \quad (5.1)$$

У деяких випадках для плавної зміни потоку випромінення застосовують середовища у вигляді поглинаючої рідини або сірого клину. Товщина шару поглинаючого середовища змінюється як показано на рисунку 5.1, що досягається поступовим наповненням прозорої посудини А в таку ж посудину В, яка заповнена речовиною.

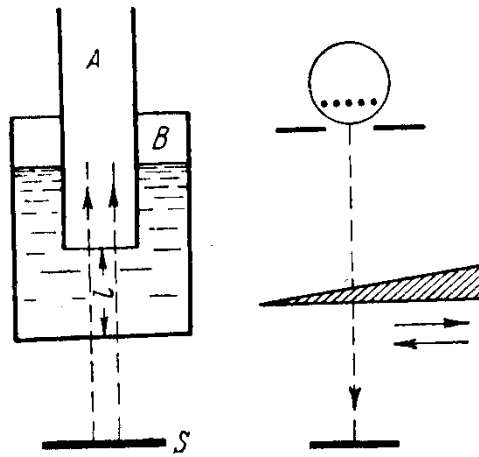


Рисунок 5.1 – Зміна товщини шару поглинаючого середовища

У випадку застосування сірого клину його розташовують перпендикулярно до розповсюдження випромінювання.

Таким чином яскравість освітлюваної поверхні залежить від товщини шару речовини і розраховується за наступною формулою:

$$L = L_0 \tau \quad (5.2)$$

За законом Бугера  $\tau = e^{-\kappa l}$  (5.3)

$$L = C e^{-\kappa l}, \quad (5.4)$$

де  $\kappa$  – показник поглинання середовища;

$\tau$  – коефіцієнт пропускання середовища;

$l$  – товщина шару речовини.

Однак слід пам'ятати, що нейтральні для світлових вимірювань світлофільтри не завжди можуть бути нейтральні для енергетичних вимірювань.

Нейтральні світлофільтри послаблюють випромінювання в декілька разів.

**Закон косинусів** для освітлення також знаходить застосування при необхідності регулювання світлового потоку. На рисунку 5.2 наведена схема застосування закону косинусів для регулювання світлового потоку. Якщо поверхня, що досліджується, може повертатися відносно напрямку

розповсюдження випромінювання, то освітленість її плавно змінюється за законом зворотних квадратів, і тому

$$E = C \cos \alpha. \quad (5.5)$$

Постійна величина  $C$  може бути легко знайдена експериментально або розрахунковим методом.

Для зменшення світлового потоку можуть бути застосовані **білі дифузно розсіюючі поверхні**. У світлотехнічній практиці залежно від ступеня та характеру розсіювання випромінювання класифікується на дзеркальне, дифузне й змішане. Використовуючи дифузні поверхні для регулювання потоку випромінювання, його можна послабити в сотні разів

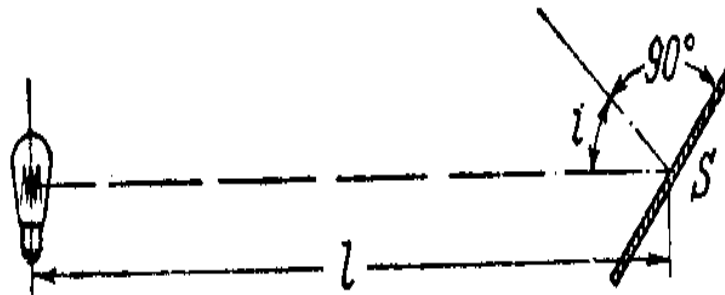


Рисунок 5.2 – Схема застосування закону косинусів для регулювання світлового потоку

**Переривчасте випромінювання.** Швидко повторююче переривисте освітлення при деяких обставинах буде сприйматися оком як неперервне та постійне. Воно дорівнює за своєю силою тому, яке було б, якщо потік випромінювання був постійним і неперервним, але меншого значення.

Сила зорового сприйняття такого випромінювання залежить від періодичності проблісків:

$$1/T = \Phi \, dt \quad (5.6)$$

де  $T$  – час одного періоду.

Припустимо, що по ходу променів від джерела випромінювання до ока спостерігача (або приймача випромінювання) розташовано коло з непрозорого

матеріалу з вирізами. Коло, яке називається секторним диском, швидко обертається. Воно періодично (за час  $T$ ) пропускає світло до ока спостерігача через вирізи, а потім перериває доступ світла непрозорим матеріалом, як це показано на рисунку 5.3. До ока спостерігача від джерела надходить світловий потік ( $\Phi$ ), який є пропорційним ( $k$ ) його яскравості ( $L$ ), коли за час  $t$  світло не перегороджується колом, а проходить крізь отвір у ньому. До ока зовсім не надходить світловий потік, коли він перегороджується непрозорою частиною кола (тобто за час  $T-t$ ). При достатньо швидкому обертанні диска око не помічає мелькотіння і джерело здається спостерігачеві поверхнею з постійною яскравістю, причому меншою, ніж дійсна. Одне обертання кола є часом  $n T$ . За час повного обертання кола око освітлюється тільки в період  $(n t)$ .

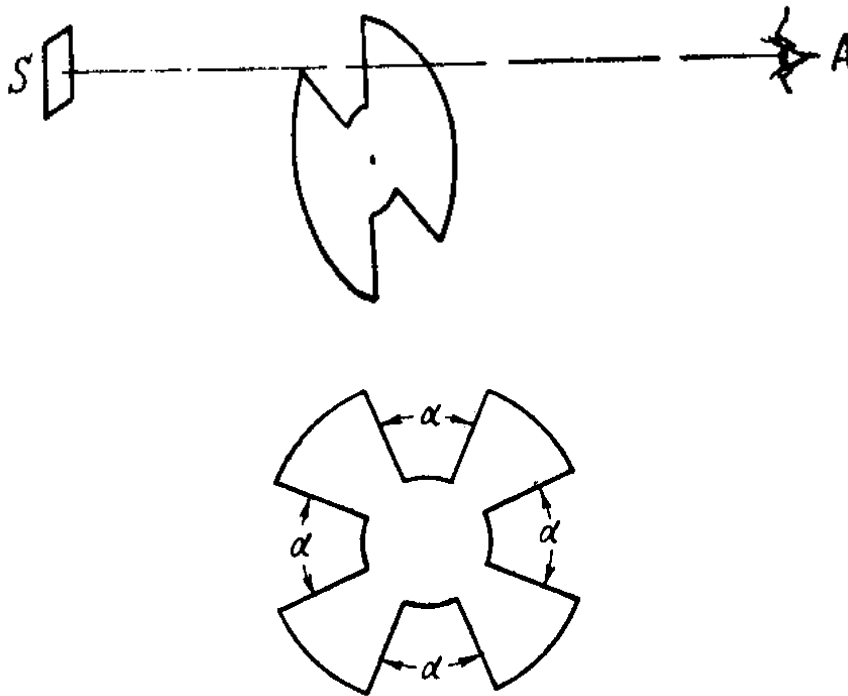


Рисунок 5.3

Якщо коло обертається з постійною швидкістю, то

$$L_1 = L_0 n t / n T = L_0 t / T, \quad (5.7)$$

або 
$$L_1 = L_0 4\alpha / 360. \quad (5.8)$$

**Поляризація світла** для регулювання світлового потоку часто застосовується у фотометричних схемах вимірювання. Пропустивши пучок

неполяризованого світла через поляризаційну призму, можна отримати два пучки світла. Світлові потоки кожного вторинного пучка складають лише половину світлового потоку неполяризованого випромінення, зменшеного на коефіцієнт пропущення призми. Залежно від взаємного розташування головних оптичних площин обох призм світловий потік  $\Phi$  після проходження другої призми може розкластися на потоки  $\Phi_1$  і  $\Phi_2$ :

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi \cos \theta + \Phi \sin \theta , \quad (5.9)$$

де  $\theta$  - кут між головними оптичними площинами двох поляризаційних призм.

У подальшому для вимірювання використовується тільки один потік.

**Зміна площі світної поверхні або пучка променів.** Для цих цілей застосовують діафрагми, щити із змінною площею і заслони, як показано на рисунку 5.4.

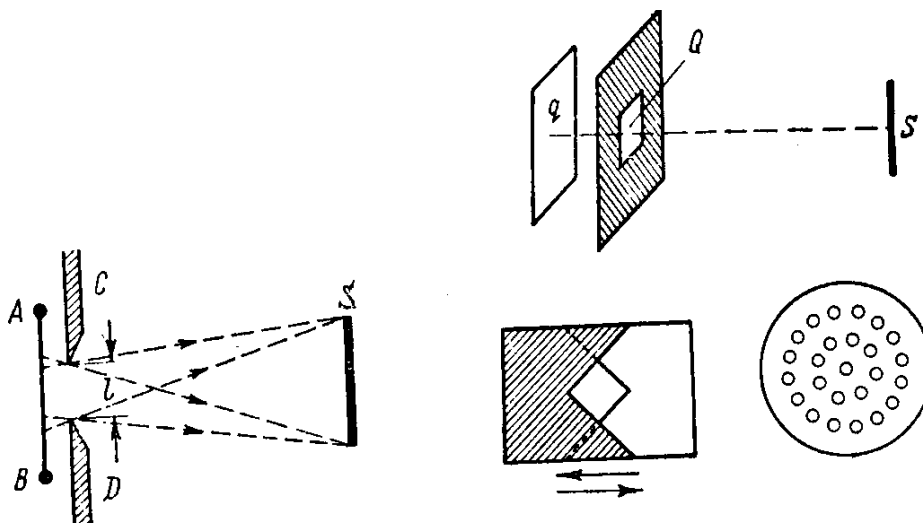


Рисунок 5.4 – Зміна площі світної поверхні або пучка променів

**Застосуванням лінзи** можна як послабити випромінювання, так і посилити його, якщо встановити її між джерелом світла і дослідженою ділянкою. Пересуванням лінзи можна одержати повільну зміну освітленості, що є досить привабливим. Ступінь зміни освітленості можна розрахувати, якщо відомі оптичні властивості лінзи.

## ТЕМА 6 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОГО ПОТОКУ. ФОТОМЕТРИ

### 6.1 Розподільчий фотометр

Вимірювання величини світлового потоку засновується на співвідношеннях, що зв'язують силу світла джерела із світловим потоком, який це джерело випромінює в межах деякого тілесного кута:

$$\Phi = \sum I \omega, \quad (6.1)$$

де  $\Phi$  – світловий потік джерела світла;

$I$  – сила світла джерела;

$\omega$  – тілесний кут, в межах якого світловий потік розповсюджується.

Найбільш простим вирішенням цього завдання є метод зональних тілесних кутів, коли весь простір розбивається на зональні тілесні кути, в межах яких сила світла може бути прийнята постійною величиною, тоді:

$$\Phi = 2\pi \sum I (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (6.2)$$

Виміряти силу світла джерела в різних напрямках й побудувати криву сили світла можна за допомогою розподільчого фотометра, названого так тому, що за його допомогою можливо визначити розподіл сили світла джерела в просторі.

Ідея розподільчого фотометра полягає в побудові кривої сили світла залежно від кута спостереження. Суть такого пристрою полягає в тому, що він дає змогу направляти від джерела випромінювання до приймача випромінювання промені світла з різних напрямів, на основі цих вимірів і будується крива сили світла.

Виконати таке завдання можливо різними методами, у зв'язку з чим запропоновано декілька пристроїв для розподільчих фотометрів, які дещо відрізняються один від одного.

Метод розрахунку світлового потоку за допомогою зональних тілесних кутів по кривих розподілу сили світла в просторі є найбільш точним.

Для розрахунку може бути застосований один із способів розбивки простору на тілесні кути. Причому один з них засновується на розбивці всього простору за зонами рівним значенням кута  $\alpha = \text{const}$ . Так, якщо вибрати число зон  $n = 18$ , то  $\alpha = 10$  градусів. Зональні тілесні кути будуть визначатися за формулою:

$$\omega = 2\pi (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (6.3)$$

Другий спосіб полягає у розбивці всього простору на зони з рівними значеннями тілесних кутів  $\omega = 4\pi / n = \text{const}$ . Для цього необхідно розрахувати значення кутів  $\alpha$  для середин тілесних кутів усіх зон і значення сили світла цієї зони обирати для цих кутів. Тоді потік світла визначиться так:

$$\Phi = \sum I \omega = 4\pi / n \sum I. \quad (6.4)$$

Для зміни напрямку променів застосовують різні оптичні пристрої: дзеркала, призми тощо. Вони складають одну з основних частин пристрою.

Улаштування одного з існуючих розподільчих фотометрів наведено на рисунку 6.1.

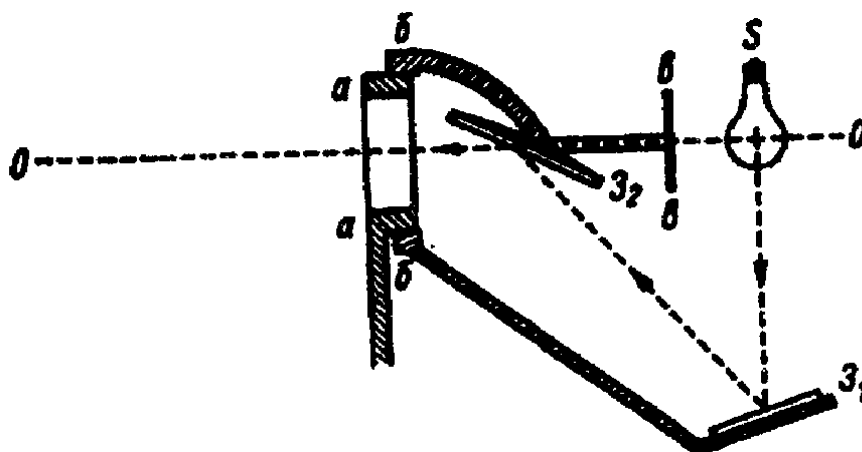


Рисунок 6.1 – Розподільчий фотометр

Джерело світла залишається нерухомим. Навколо нього може обертатися дзеркало 31, яке закріплене на кронштейні. Промінь світла від джерела, відбиваючись від дзеркала 31, направляється на додаткове дзеркало 32, і далі на приймач випромінювання. Вісь обертання дзеркала направлена вздовж лінії ОО. Крім того місце розташування джерела світла і центр кола, який описує дзеркало 31, обов'язково співпадають. Прямі промені від джерела світла до приймача перегороджуються непрозорим чорним екраном (в-в). На підшипнику обертання кронштейну розташовується коло з вказаними значеннями кутів обертання. До плеча кронштейна прикріплена стрілка, за допомогою якої відраховуються напрями сили світла, що визначається.

Позаду джерела світла, навколо дзеркала і перед приймачем ставлять чорні екрани для захисту від стороннього світла.

Розміри дзеркала вибирають такими, щоб на фотоелемент попадали всі промені від світних частин світлового пристрою.

Експеримент засновується на можливості виміряти силу світла І джерела у великій кількості  $n$  заздалегідь обраних напрямів  $i$ , враховуючи справедливим допущення, що всередині достатньо малих тілесних кутів  $\omega$ , побудованих навколо кожного з цих напрямів, сила світла джерела практично постійна. Повний світловий потік можна розрахувати, додаючи всі  $\Phi_i$  і за умови, що додаток всіх тілесних кутів заповнює простір без пропусків.

Математично це виглядає так:  $\Phi = \sum I_i \omega_i$ ;  $\sum \omega = 4\pi$ .

Кількість зональних тілесних кутів, на які треба розбити увесь простір, залежить від форми кривої розподілу сили світла і від похибки, яку можна допустити при визначенні світлового потоку. Для джерел світла, які мають симетричну криву розподілу сили світла, виміри виконують два рази для двох значень кутів  $\beta$  які відрізняються один від одного на  $90^\circ$ , а далі результат усереднюється.



Для несиметричних джерел світла будується сімейство кривих сили світла для різних значень кутів, а далі значення сили світла кожної зони приймається середньоарифметичним значенням для всіх значень кутів  $\beta$ .

Для вимірювання світлорозподілу симетричних вогнів прожекторів з вузьконаправленим світлорозподілом потрібно дотримуватися великих відстаней між джерелом та приймачем. Ця відстань повинна бути більше дистанції формування пучка променів. Дистанцію формування пучка променів світлового потоку можна визначити, якщо повільно віддалятися від нього та спостерігати вихідне вікно джерела випромінювання. На відстані, яка дорівнюється дистанції формування пучка променів все вихідне вікно буде сприйматися рівнояскравим.

Для сигнальних вогнів та джерел типу автомобільних фар замість подовжніх кривих сили світла будують криві рівних значень сили світла в прямокутній системі координат. Для таких досліджень варто застосовувати пристрій, який називається гоніофотометром.



Рисунок 6.2 – Гоніофотометр

## 6.2 Інтегруючий фотометр

Визначення світлового потоку джерела випромінювання на підставі виміру його сили світла в різних напрямках потребує великої кількості часу й

необхідності математичного розрахунку методом зональних тілесних кутів всього світлового потоку, що випромінює джерело.

У багатьох випадках для визначення світлового потоку ламп або світильників віддають перевагу використанню більш простому способу. Одним з таких способів є використання інтегруючого фотометра, який являє собою порожню всередині сферу, розміри якої обирають залежно від габаритів джерела світла або світильника, його світлового потоку й потужності.

Для ламп розжарювання застосовують інтегруючі сфери діаметром від 1 до 2 метрів. Для світлових приладів такі сфери мають діаметр до 3 метрів і більше.

Внутрішня поверхня сфери покрита білою матовою фарбою, яка дифузно розсіює світло. У сфері робиться вікно, крізь яке відводиться на розташований поза сферою світловимірювальний прилад невелика частка світлового потоку, що повинна бути пропорційною всьому світловому потоку джерела випромінювання.

#### 6.2.1 Теорія світломірної сфери

Припустимо, що всередині сфери розташовано джерело випромінювання, світловий потік якого складає  $\Phi$  (рис. 6.3). Внутрішня поверхня сфери покрита однорідною білою (або сірою) фарбою, яка не змінює спектральний склад відбитого випромінювання, ідеально матовою. Коефіцієнт відбиття поверхні однаковий для всіх точок поверхні сфери і складає  $\rho$ .

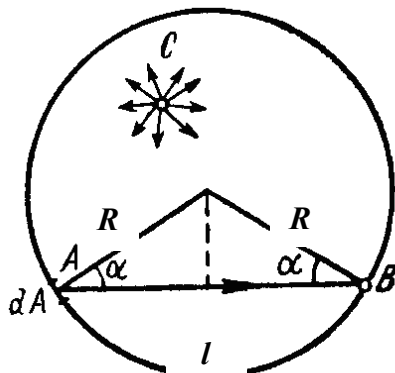


Рисунок 6.3

Положення джерела випромінення у сфері для теоретичних міркувань значення не має. Прямі промені від джерела створюють на поверхні сфери освітленість  $E_1$ , яка відрізняється в різних точках поверхні і залежить від сили світла джерела в даному напрямку і від його положення.

Відбившись від поверхні, світло знову падає на поверхню сфери і створює вторинну освітленість  $E_2$ , вторинна освітленість створює – третинну і так далі, поки не встановиться освітленість, створена за рахунок багатократних відбиттів  $E_{\text{мко}}$ .

Вторинна освітленість, що створюється елементом поверхні  $dA$  в точці  $B$ :

$$dE_2 = dI_1 / l^2 = L_1 dA \cos^2 \alpha / l^2 = E_1 \rho dA \cos^2 \alpha / \pi l^2, \quad (6.5)$$

де

$$\cos \alpha = l / 2 R, \quad (6.6)$$

тоді:

$$dE_2 = E_1 \rho dA / \pi 4R^2 = (\rho / 4\pi R^2) E_1 dA. \quad (6.7)$$

Коефіцієнт  $(\rho / 4\pi R^2)$  залежить тільки від параметрів сфери і для даного фотометра залишається величиною постійною.

У точці  $B$  вторинна освітленість створюється не тільки часткою поверхні  $dA$ , але й всією поверхнею сфери. Повну освітленість у точці  $B$  ( $E_2$ ) можна визначити, інтегруючи по всій поверхні сфери за виразом:

$$dE_2 = (\rho / 4\pi R^2) E_1 dA. \quad (6.8)$$

У результаті інтегрування частка  $E_1 dA$  дасть увесь потік, що впав на поверхню сфери при прямих променях:

$$E_2 = (\rho / 4\pi R^2) \Phi. \quad (6.9)$$

Вторинна освітленість буде однаковою для всіх точок поверхні сфери (положення джерела обиралося вільним). Шляхом таких міркувань легко знайти, що третинна освітленість:

$$E_3 = \rho E_2 = \Phi \rho^2 / 4\pi R^2 \quad (6.10)$$

Наступні освітленості визначатимуться таким чином:

$$E_i = \Phi \rho^{i-1} / 4\pi R^2. \quad (6.11)$$

Повна освітленість поверхні сфери в будь-якій точці сфери:

$$E_{\text{мко}} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_i = E_1 + (\Phi / 4\pi R^2) \rho / (1 - \rho). \quad (6.12)$$

Друга складова цього виразу прямо пропорційна всьому світловому потоку джерела світла, однакова для всіх частин поверхні сфери і не залежить від розподілу світлового потоку в просторі. Тобто метою впровадження інтегруючої сфери є можливість виміру будь-якої світлової величини, пропорційної другій складовій визначення освітленості (6.12). Тому для визначення світлового потоку необхідно виключити первинну складову освітленості ( $E_1$ ), що забезпечить достовірність вимірювання.

### 6.2.2 Конструкція фотометра

Конструкція інтегруючого фотометра наведена на рисунку 6.4. Вона включає в себе наступні елементи: металева сфера (Ш), досліджуване джерело випромінення (S), приймач випромінення (ФЕ) із реєструючим приладом, молочне скло (М), екран для запобігання можливості попадання прямої складової випромінення (Е) на приймач, вікно для можливості розміщення джерела випромінення у сфері.

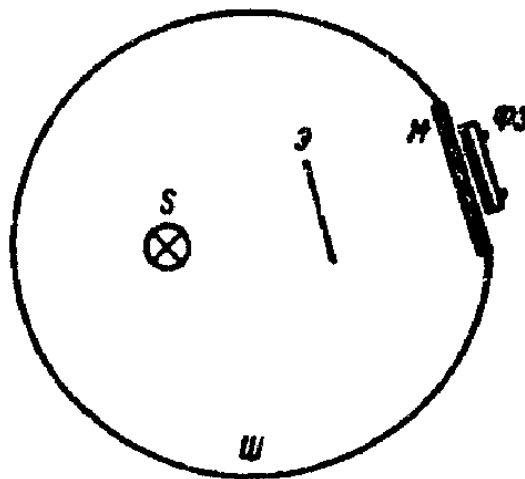


Рисунок 6.4 – Інтегруючий фотометр

Введення в конструкцію фотометра кожного з вищенаведених конструктивних елементів змінює однорідність поверхні сфери і вносить додаткову похибку. Для зменшення впливу елементів конструкції на якість

вимірювання всі вони фарбуються тією ж дифузною фарбою. Крім того бажано, щоб досліджуване джерело світла знаходилося у центрі сфери, а найбільший габаритний розмір джерела не перевищував  $0,1R$ .

Молочне скло застосовують для усунення наявності так званого негативного випромінювача, тобто поглинача випромінення, таким чином коефіцієнт відбиття молочного скла і поверхні сфери практично рівні, що дещо знижає похибку. Крім того на поверхню приймача падає випромінення, що пройшло через молочне скло, яке є практично Ламбертовим випромінювачем, що забезпечує рівномірність падаючого потоку.

### 6.2.3 Методика вимірювання в інтегруючому фотометрі

При вимірюванні світлового потоку за допомогою інтегруючого фотометра віддають перевагу способу заміщення, який складається з наступного:

1. У сферу через спеціальне віконце вміщують зразкову лампу, світловий потік якої при номінальній напрузі живлення точно відомий і реєструють реакцію приймача на випромінення, що надійшло через віконце сфери на фотоелемент ( $K_{\text{ет}}$ ).

2. На те саме місце у сфері розміщують досліджуване джерело світла, світловий потік якого слід виміряти. При цьому вимірюють значення реакції приймача на випромінювання  $K_x$ .

3. Світловий потік досліджуваної лампи розраховують за формулою:

$$\Phi_x = A \Phi_{\text{ет}} K_x / K_{\text{ет}}, \quad (6.13)$$

де  $A$  – коефіцієнт актинічності, значення якого обирається в залежності від типу джерела світла.

## 6.3 Телецентричний фотометр для вимірювання сили світла

### 6.3.1 Телецентричний метод

Телецентричний метод полягає у використанні телецентричної системи, що складається з об'єктиву й діафрагми, яка розташована у фокальній площині

цього об'єктиву. На рисунку 6.5 наведена оптична схема телецентричної системи. Через отвір у діафрагмі Д проходять тільки ті промені, що знаходяться в межах тілесного кута  $\omega$ , який обмежений плоским кутом  $\alpha$ . Промені, які падають під однаковими кутами, зійдуться в одній точці фокальної площини простору відображень. З будь-якої точки простору крізь отвір у діафрагмі пройдуть промені, які обмежені таким же тілесним кутом, що й промені, які вийшли з фокуса. Це правило розповсюджується на всі точки предметів, які знаходяться в межах тілесного кута і спираються на вхідну зіницю об'єктиву.

Тоді потік, який пройде через отвір у діафрагмі від будь-якого джерела випромінювання, що знаходитиметься в межах тілесного кута, яке його обмежує, буде пропорційним силі світла цього джерела :  $\Phi = I \omega \tau_{\text{ос}}$ .

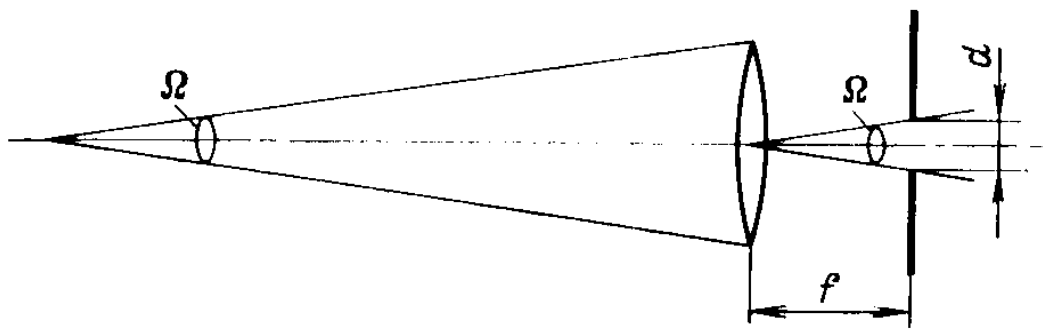


Рисунок 6.5 – Телецентричний фотометр

Якщо за діафрагмою встановити фотоелектричний приймач випромінювання, то реакція цього приймача буде пропорційна потоку випромінювання, а значить і силі світла:

$$i = \Phi S = S I \omega \tau_{\text{ос}}. \quad (6.13)$$

Тілесний кут  $\omega$  визначається як частина простору, обмежена деякою конусною поверхнею, і чисельно дорівнює відношенню площі А, яка вирізається на поверхні сфери радіусом, до квадрату радіусу цієї сфери:

$$\omega = \pi d^2 / 4 f^2, \quad (6.14)$$

$$\text{тоді} \quad i = S I (\pi d^2 / 4 f^2) \tau_{\text{ос}}. \quad (6.15)$$

З вищенаведеної залежності видно, що величина  $S (\pi d^2 / 4 f^2) \tau_{oc}$  для даного приладу є постійною і залежить тільки від параметрів оптичної системи і приймача випромінювання.

Для того, щоб виміряти значення сили світла досліджуваного джерела, треба виміряти значення реакції приймача ( $i$ ) й знайти величину постійної складової приладу. Постійна складова може бути визначена двома шляхами:

1) розрахована математично, при наявності довідкових даних про параметри приймача випромінювання, коефіцієнта пропускання оптичної системи фотометра і значень його тілесного кута;

2) виміряна експериментально за допомогою джерела з відомим значенням сили світла. Для цього зразкове джерело світла розміщують перед фотометром і вимірюють значення реакції приймача. Потім розраховують значення постійної складової :

$$C = S (\pi d^2 / 4 f^2) \tau_{oc} = i / I. \quad (6.16)$$

У приладі за польовою діафрагмою встановлюється польова лінза, що забезпечує рівномірне освітлення приймача випромінювання.

Для забезпечення правильності вимірювання необхідно стежити, щоб джерело випромінювання знаходилося від об'єктиву фотометра на відстані, що не перевищувала допустиме ( $l_{доп}$ ):

$$l_{доп} = (D-H) f / d. \quad (6.17)$$

Перевагою такої системи є можливість виміряти світлові величини в незатемненому приміщенні. Для запобігання попаданню відбитого світла на вхідну зіницю приладу за джерелом розміщують темний екран.

### 6.3.2 Вимірювання сили світла й світлового потоку за допомогою фотометра АФМ

Для вимірювання сили світла у фотометрах, які називаються – свічелірами використовується телецентрична оптична система. Вона складається з об'єктиву 1 і діафрагми 2, що розташовані в його фокальній площині (рис.6.6).

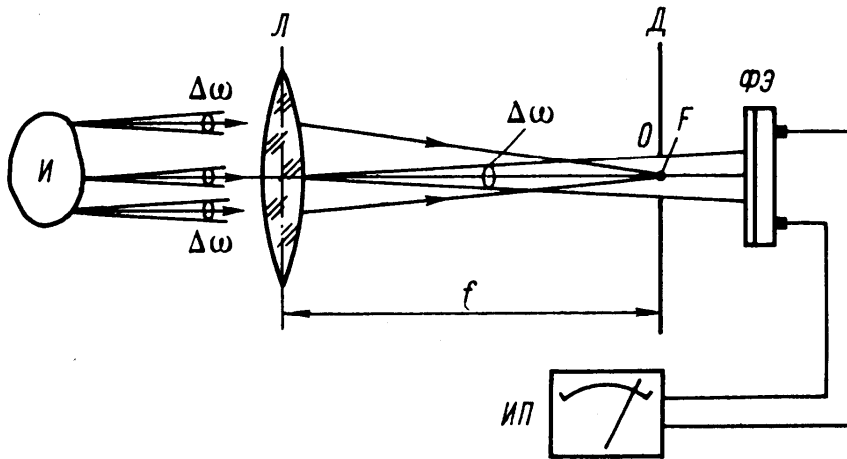


Рисунок 6.6 – Оптична схема фотометра АФМ

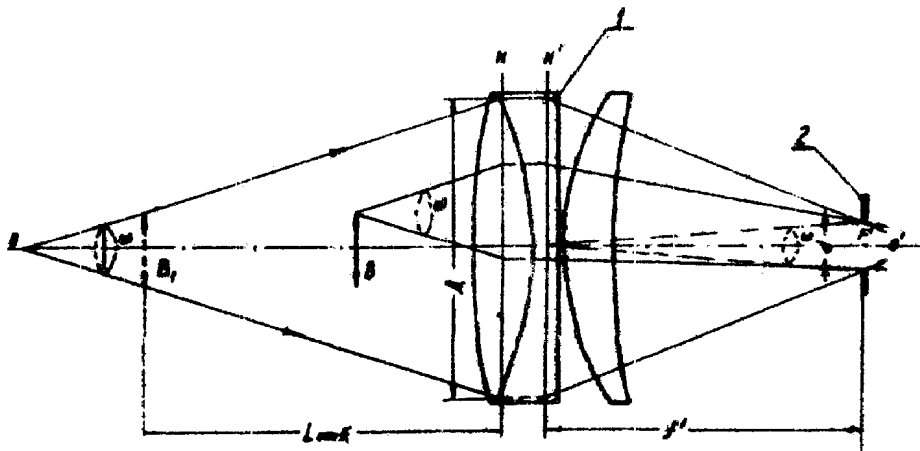


Рисунок 6.7 – Оптична схема свічєміра

Така система обирає з усієї множини променів від джерела світла тільки ті, які обмежені тілесним кутом  $\omega = \frac{\pi d^2}{4f^2}$ , де  $d$  – діаметр діафрагми, що дорівнює 5 мм, а  $f$  – фокусна відстань об'єктиву, що складає 200 мм.

Для виміру сили світла користуються об'єктивом, що може зніматися. Вимірюване джерело світла встановлюють перед об'єктивом приладу так, щоб воно не виходило за межі тілесного кута. Необхідно стежити і за тим, щоб на об'єктив приладу не попадало пряме світло від сторонніх об'єктів та джерел.

Встановивши джерело світла перед об'єктивом, слід пам'ятати, що вимірювання світлового потоку відбувається у напрямі оптичної вісі приладу.



Після вмикання джерела світла в мережу береться відлік за шкалою вимірювального приладу. Силу світла розраховують за формулою:

$$I = A \cdot C \cdot \frac{1}{\tau} P, \quad (6.18)$$

де  $C$  – ціна розподілу приладу, кд/м<sup>2</sup> розпод. (за атестатом приладу);

$P$  – поправка на чутливість приладу;

$A$  – відлік розподілів за шкалою приладу;

$\tau_{\text{заг}}$  – загальний коефіцієнт пропускання обраних світлофільтрів.

Для встановлення значення світлового потоку застосовують такі формули:

$$\Phi = I \pi^2 - \text{для ЛЛ},$$

$$\Phi = 4 \pi I - \text{для ЛР}.$$

## ТЕМА 7 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОСВІТЛЕНOSTІ. ЛЮКСМЕТРИ

Освітленість як поверхнева щільність світлового потоку не залежить від світлових властивостей освітлюваної поверхні. Вимірювання освітленості найбільш поширено у світлотехніці, бо однозначно характеризує освітленість робочого місця та ефективність роботи освітлювальної установки.

Цілий ряд нормативних документів встановлює мінімальні норми освітленості для кожного виду робіт і строгий порядок перевірки рівня освітленості на кожному робочому місті за допомогою спеціальних переносних пристроїв – люксометрів. При вимірюванні фотоелемент люксометра розміщують в те місце, де вимірюється освітленість, причому так, щоб його світлочутлива поверхня співпадала з контрольованою площиною.

Люксометри – це прилади для вимірювання освітленості в приміщеннях різного призначення, на робочих місцях, а також на відкритому просторі. Це складна система, до складу якої входить фотодіод, підсилювач сигналу з фотодіода, аналогово-цифровий перетворювач, а також косинусна насадка та світлові фільтри. Працює люксометр на явищі внутрішнього фотоелектричного ефекту. Коли світловий потік потрапляє на напівпровідниковий фотоелемент, відбувається вивільнення електронів в об'ємі напівпровідника і як наслідок – через фотоелемент проходить електричний струм. Причому сила цього струму прямо пропорційна інтенсивності світла, тобто освітленості фотоелемента, а кінетична енергія фотоелектронів прямо пропорційна частоті світла. Такі прості математичні залежності дозволяють виразити величину освітленості кількісно.

У перших аналогових люксометрах освітленість розраховувалась за кутом відхилення стрілки гальванометра. Після винайдення селенового фотодіода та вдосконалення вакуумних фотоелементів, електрична фотометрія набула широкого застосування як в побутових так і в промислових масштабах. Сучасні люксометри – це портативні цифрові прилади, з рідкокристалічним екраном, на якому відображається результат вимірювання, з високими ступенями захисту корпусу та чутливого елемента, а також з набором додаткових функцій та можливостей.

В більш дешевих моделях люксметрів світлочутливий елемент може бути жорстко закріплений на корпусі, що обмежує можливості використання приладу. Гнучке з'єднання вимірювальної частини з приладом забезпечує можливості вимірювання у важкодоступних місцях.

Селеновий фотодіод є надзвичайно чутливим не тільки до видимого випромінювання, але й до ультрафіолетових та інфрачервоних променів, які не сприймаються людським оком. Тому в сучасних люксметрах широко використовуються корегуючі світлофільтри, які відсікають ці області спектру та наближають чутливість фотоелемента до чутливості людського ока. З іншого боку, потрібно враховувати і те, що кожне джерело (лампа розжарювання, люмінесцентна лампа, діодний світильник та ін.) має свій спектр випромінювання, тому для кожного люксметра потрібно використовувати свої коефіцієнти для різних типів ламп. Наприклад при вимірюванні освітленості, що створюється люмінесцентними лампами, вводять поправочний коефіцієнт для ламп денного світла 0,88, а для ламп білого світла – 1,15.

На рисунку 7.1 наведено електричну схему люксметра.

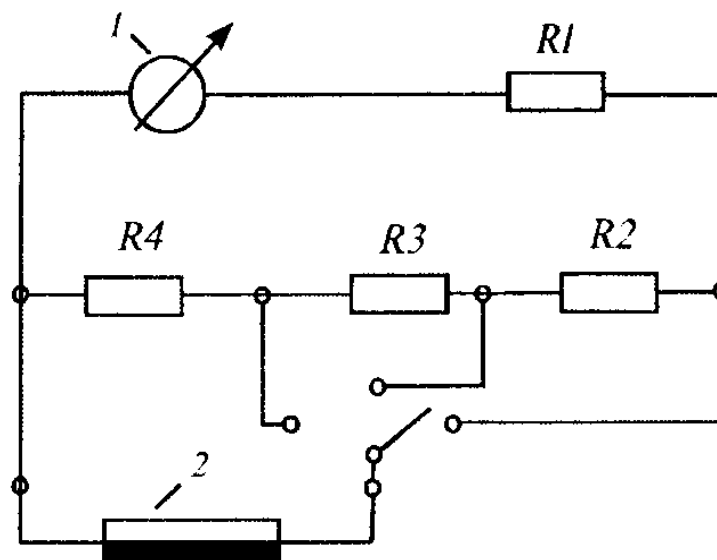


Рисунок 7.1 – Електрична схема люксметра

Для вимірювання просторових характеристик освітленості теж існують свої засоби – це насадки сферичної та циліндричної форми. Для підвищення точності вимірювання освітленості при падінні світла під кутом теж можна

використовувати спеціальні насадки. У випадку слабких джерел світла, а також коли необхідна особливо висока точність, варто скористатись вакуумними фотоелементами.

### **7.1 Порівняльні характеристики та огляд люкметрів**





Маркет вимірювальних приладів пропонує широкий вибір люкметрів для різних задач, від недорогих, простих у користуванні моделей, до складних вимірювальних систем з масою додаткових аксесуарів.

Найпростіші моделі люкметрів (такі як LX-1010BS та Ezodo SP-216) характеризуються відносно невисокою вартістю та призначені для вимірювань оціночного характеру, що не вимагають високої прецизійності. Відсутність світлових фільтрів зумовлює точність порядку 10 Вт/м<sup>2</sup>, проте цього цілком достатньо для контролю рівня освітленості у рослинництві, метеорології, у закритих приміщеннях різного призначення, а також на відкритому просторі. До переваг цих люкметрів можна віднести великий рідкокристалічний екран, зрозуміле меню приладу, гнучке з'єднання чутливого елемента з приладом, що забезпечує можливість вимірювань у важкодоступних місцях.

Модель люкметра ТМ 202 вже оснащена фільтром для відсікання випромінювання поза видимим діапазоном, має півтораметровий кабель з'єднання датчика з приладом, характеризується набором додаткових функцій таких як індикація перенавантаження, індикація низького заряду батареї, фіксація значення, функція максимального, мінімального та усередненого значення. Цей люкметр призначений для вимірювання всіх видимих джерел світла в приміщеннях різного призначення.

Люкметр ТМ-213 UVAB розроблений спеціально для вимірювання потужності ультрафіолетового випромінювання (УФВ). Цей люкметр застосовується для санітарного та технічного контролю, для контролю стану навколишнього середовища (пляж, відкрита місцевість, солярії) на предмет УФВ, для лабораторно-дослідних потреб і тому подібне.

Таблиця 7.1 – Технічні характеристики люксметрів

Параметри				
	LX-1010BS	SP-216	TM 202	TM-213 UVAB
Діапазон вимірювання	0-100 000 LUX	0-1999 Вт/м <sup>2</sup> 0-634 BTU	20,200,2000, 20000, 200000 лк 20,200,2000,20000	4000 мкВт/см <sup>2</sup> , 20 мкВт /см <sup>2</sup>
Роздільна здатність	-	0.1 Вт/м <sup>2</sup> , або 0.1 BTU	-	1 мкВт/см <sup>2</sup> , 0,01 мкВт/см <sup>2</sup>
Точність	-	±10 Вт/м <sup>2</sup> ±3 BTU	+/- 3 %	±5%повного діапазону +2 од.
Час спрацювання	0,4 с	0.25 с	-	0,4 с
Габарити	116×70×29 мм	132x60x38 мм	130 x 55 x 38 мм	133x48x23 мм
Вага	200 г	150 г.	250 г	90 г

## 7.2 Візуальні методи вимірювання освітленості

Візуальні методи вимірювання освітленості засновані на порівнянні яскравості полів порівняння, одне з яких еталонне і створюється внутрішнім джерелом випромінювання, а друге – досліджуване і створюється яскравістю дифузної поверхні, яка освітлюється досліджуванним зразком..

Будова тубус-фотометра наведена на рисунку 7.2.

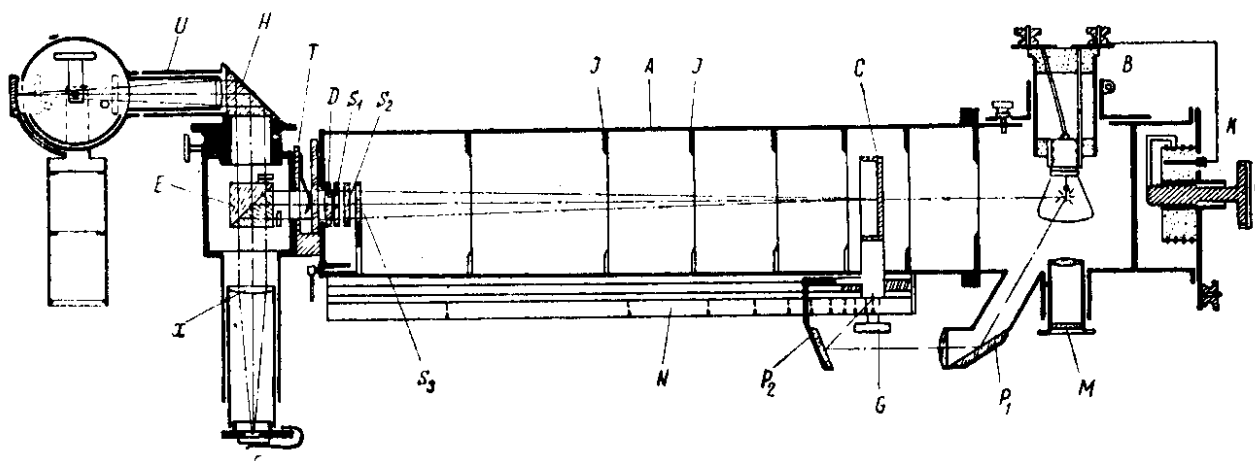


Рисунок 7.2 – Будова тубус-фотометра

Циліндрична труба діаметром 30 см з одного кінця має електричну лампочку розжарювання, сила світла якої 1–2 кд. В середині труби може розташовуватися молочне скло С. Змінюючи відстань між ним і електричною лампочкою, можна отримати різні освітленості цього молочного скла. З другої

сторони труби знаходиться лінза D, яка дозволяє спостерігачу бачити через фотометричний кубик E молочне скло C. Око спостерігача розташоване в точці F. При переміщенні скла C за допомогою рукоятки G спостерігач бачить його, як одне із полем порівняння у фотометричному кубіку з різною яскравістю. Друге поле порівняння створюється окремою випробувальною платівкою, яку спостерігач бачить крізь той же кубик E і призму повного внутрішнього відбиття H. Для того щоб скло C освітлювалось тільки електричною лампою розжарювання та на нього не попадали промені, що відбиваються від стінок труби, уздовж неї встановлені поперечні щитки з отворами. Зі сторони, де знаходиться електрична лампа розташовано реостат K. Він дозволяє за допомогою поворотів рукоятки L змінювати силу струму в ланцюзі, що живить лампу. Трубка M, яка має невелику лінзу, дозволяє встановлювати електричну лампочку в правильне положення по відношенню до шкали приладу N. Шкала приладу N освітлюється світлом від лампочки, відбитим дзеркалами  $P_1$  і  $P_2$ . На шляху хода променів від молочного скла до ока спостерігача біля лінзи D можуть розміщуватися сірі поглиначі  $S_1$   $S_2$ .

Прилад з однієї сторони має циліндричну трубку U. На неї надівається насадка для вимірювання освітленості об'єкта, що визначається. Через трубку U спостерігач бачить молочне скло MC1, яке і є одним з полів порівняння через декілька лінз, що розташовані на шляху хода променів. Ці лінзи дають дійсне зображення молочного скла MC1 в місці оптичного контакту призм. Лінза D також дає зображення в тому ж місці. Зовнішнє поле порівняння створюється молочним склом MC1, що освітлюється зовнішнім досліджуваним джерелом світла DC1. Випромінювання від MC1, відбившись від дзеркала, надходить на фотометричний кубик. Друге поле порівняння створюється яскравістю рухомого молочного скла C, яке освітлюється внутрішнім джерелом світла - електричною лампочкою.

Яскравість молочного скла MC1 пропорційна освітленості  $E_1$ .

Яскравість молочного скла  $C$  пропорційна силі світла джерела – електричної лампочки і зворотно пропорційна квадрату відстані між джерелом і молочним склом.

Нейтральні світлофільтри служать для розширення меж вимірювання.

$$L_1 = \frac{E_1}{\pi} (\tau_{MC1} \tau_{HC1} \rho_3); \quad (7.1)$$

$$L_2 = \frac{I_2}{\pi l_2^2} (\tau_{MC2} \tau_{HC2}); \quad (7.2)$$

$$L_1 = L_2; \quad (7.3)$$

$$\frac{E_1}{\pi} (\tau_{MC1} \tau_{HC1} \rho_3) = \frac{I_2}{\pi l_2^2} (\tau_{MC2} \tau_{HC2}); \quad (7.4)$$

$$E_1 = \frac{I_2}{l_2^2} \left( \frac{\tau_{MC2} \tau_{HC2}}{\tau_{MC1} \tau_{HC1} \rho_3} \right); \quad (7.5)$$

$$E_1 = C I_2 / l_2^2. \quad (7.6)$$

Для визначення постійної величини  $C$  перед початком вимірювання проводять калібрування фотометра. Для цього на деякій відстані від фотометра розміщують джерело світла ДС1 з відомим значенням сили світла  $I_1$ . Проводячи регулювання відстані від внутрішньої лампи ДС2 до молочного скла МС2, добиваються фотометричної рівноваги і проводять розрахунок за формулою:

$$C = \frac{I_1 l_2^2}{I_2 l_1^2} \quad (7.7)$$

## ТЕМА 8 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ЯСКРАВОСТІ. ЯСКРАВОМІРИ

Яскравість характеризує світність поверхні в деякому напрямку, необхідність її вимірювання виникає досить часто. Завдання такого роду можуть бути дуже різноманітні. По-перше, це вимірювання яскравості джерела світла як досить протяжних розмірів (яскравість неба), так і досить малих (нитка лампи розжарювання). По-друге, бувають випадки, коли треба визначити яскравість освітленого предмета, розміри якого можуть бути самими різноманітними, а поверхня мати неоднорідну структуру, тоді завдання зводиться до вимірювання яскравості малої ділянки.

Безпосередньо вимірювання яскравості візуальним методом шляхом порівняння досліджуваної яскравості з відомою зустрічається на практиці рідко (прикладом може служити оптична пірометрія). Інші методи вимірювання можна розділити на дві групи.

До першої належать завдання, коли треба визначити яскравість заданої точки джерела або, точніше, середню яскравість площадки джерела, достатньо малих розмірів, щоб яскравість в її межах мало змінювалась. У таких випадках говорять про локальну яскравість.

До другої групи завдань належить вимірювання яскравості, яка постійна впродовж поверхні джерела, а також вимірювання середнього в межах джерела значення яскравості. Тоді говорять про габаритну яскравість.

Пристрої, які служать для визначення яскравості, називаються яскравомірами.

Для того, щоб виміряти яскравість, слід згадати, який існує зв'язок між яскравістю та іншими світловими величинами, наприклад силою світла, яка сама вимірюється через освітленість. Таким чином, треба знайти вимірювальний пристрій, який дає змогу встановити зв'язок між яскравістю та освітленістю. Сила світла джерела визначається одним з відомих способів і труднощів тут не виникає. Але це не можна сказати про площу проекції джерела, визначення якої в деяких випадках є непростю справою.



Досить часто користуються способом, який зв'язує яскравість пучка променів з потоком випромінювання. Виділити для вимірювання яскравості достатньо малу площадку на поверхні джерела звичайно неможливо. Тому в таких випадках створюють за допомогою об'єктива зображення на екрані. В екрані робиться отвір, за яким встановлюється приймач випромінювання. При необхідності за отвором можна встановити матове скло або лінзу для більш рівномірного розподілу випромінювання по поверхні приймача. Освітленість зображення пропорційна яскравості джерела, а потік, що пройшов через отвір, є пропорційним яскравості, середньої по поверхні джерела.

На рисунку 8.1 показана принципова схема простого яскравоміра. Однією з найважливіших його частин є ахроматичний об'єктив (Об), який зображує ділянку світної поверхні на світлочутливій поверхні а'б' фотоелектричного приймача, що знаходиться за отвором в непрозорому екрані Дф. Приймач має вимірювальний пристрій, який показує значення, пропорційне світловому потоку, що падає на поверхню приймача:

$$L = \frac{\Phi}{G} = k n,$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності,

$n$  – відлік за шкалою вимірювального пристрою.

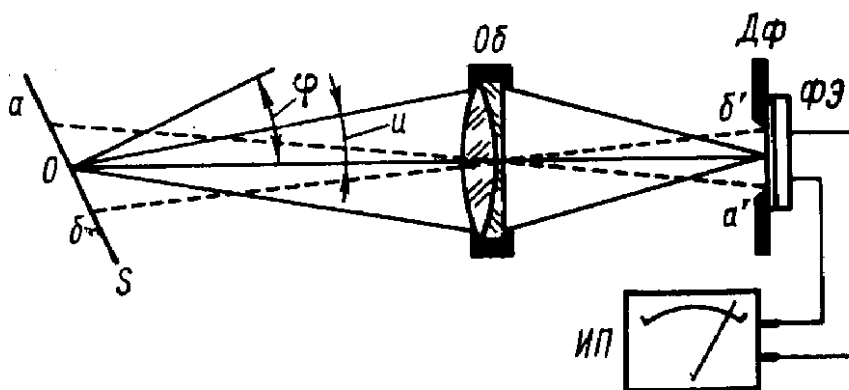


Рисунок 8.1 – Принципова схема найпростішого яскравоміра

Щоб користуватися таким приладом, його слід проградувати, тобто знайти відлік  $n_0$  за відповідною відомою яскравістю  $L_0$ . Тоді можна записати:

$$L / L_0 = n / n_0.$$

Така схема має недоліки. Вона потребує, щоб поверхня, яскравість якої треба визначити, знаходилась на певній відстані від яскравоміру, щоб зображення попадало на отвір екрану Дф. Ця вимога не завжди може бути виконана. Крім того слід враховувати можливу нерівномірність чутливості фотоприймача в різних точках його поверхні.

Одна з можливих схем удосконаленого яскравоміра подана на рисунку 8.2.

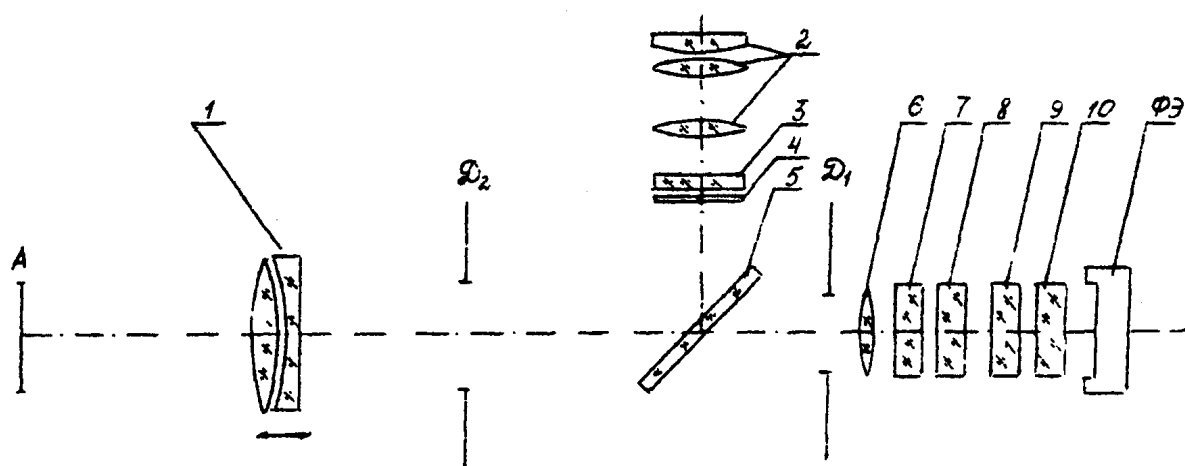


Рисунок 8.2 – Оптична схема яскравоміра

Призначення основних елементів оптичної системи яскравоміра.

Об'єктив (1) створює зображення досліджуваної ділянки поверхні А в площині польової діафрагми Д. Оптична вісь яскравоміра наводиться на досліджувану ділянку поверхні за допомогою візирного пристрою, що складається з окуляра (2), візирної сітки (4) і напівпрозорого дзеркала (5). Нейтральні фільтри (3) служать для захисту ока спостерігача при вимірі великих яскравостей. Апертурна діафрагма Д разом з польовою діафрагмою Д<sub>1</sub> формує пучок, безліч променів якого не залежить від положення об'єктива. Польова лінза (6) створює зображення апертурної діафрагми на робочій площині приймача випромінювання. Нейтральні світлофільтри (7), (8) забезпечують можливість розширення меж виміру. На дисках нейтральних світлофільтрів є вільні отвори.

Кольорові світлофільтри (9) служать для виділення вузької області спектра (наприклад, при вимірі температури), (10) – фільтр, що коригує і приводить спектральну чутливість приймача до функції  $V(\lambda)$  – нормалізованої функції відносної спектральної світлової ефективності випромінення.

## ТЕМА 9 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ОПТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТІЛ

Оптичними характеристиками тіл вважають здатність тіла поглинати, розсіювати й пропускати випромінювання. Тому найбільш часто застосовують поняття оптичних коефіцієнтів: коефіцієнтів відбиття, пропускання та поглинання, які добре відомі з курсу Основ світлотехніки.

Коефіцієнти поглинання і коефіцієнти пропускання зразка матеріалу доводиться вимірювати як саму суттєву його характеристику. В деяких випадках зразки можуть мати гладку, дзеркально відбиваючу поверхню, можуть бути виготовлені з прозорого матеріалу, який пропускає випромінення без розсіювання. В інших випадках зразки мають поверхні, які розсіюють випромінення у всіх напрямках. Тут практика мусить дати кількісну оцінку явищам, що спостерігаються, причому результати мають бути або спектральними, або інтегральними, тобто віднесеними до спектрально складного випромінення фіксованого складу, серед яких око людини займає особливе місце.

Оптичні характеристики тіл визначаються:

- спектральними характеристиками досліджуваного тіла, які залежать від характеру обробки поверхні, кута падіння пучка променів й довжини шляху пучка променів у досліджуваному тілі;
- спектральним складом потоку випромінення, що падає на тіло.

Спектральний склад потоку випромінення впливає на оптичні коефіцієнти тому, що велика кількість тіл вибірково поглинають, а значить і пропускають потоки випромінення хвиль різних довжин.

Існують інтегральні, спектральні й ефективні оптичні коефіцієнти, які визначаються коефіцієнтами поглинання, пропускання і відбиття. При визначенні ефективних оптичних коефіцієнтів слід застосовувати коригуючий фільтр, який приводить спектральну чутливість фотоелектричного приймача випромінювання до спектральної чутливості зразкового приймача

випромінювання обраної системи ефективних величин, наприклад для світової системи – око людини.

Для вимірювання інтегральних коефіцієнтів пропускання приймач випромінення повинен бути неселективним.

Для визначення спектральних оптичних коефіцієнтів необхідно вказувати тип джерела світла, яким освітлювався зразок.

Існують декілька джерел, що найчастіше застосовуються при таких вимірюваннях. Слід вказати джерела, які позначаються літерами А, В, С, Д<sub>65</sub>.

Так, джерело типу А є газонаповнена лампа розжарення з колірного температурою 2 856 К, випромінення якої створюється джерелами світла, що широко використовуються для освітлення в темний час доби і мають спектр суцільний випромінення. Джерела В (4 870 К) і С (6 670 К) відтворюють різні фази денного світла, склад якого змінюється залежно від зміни висоти Сонця і наявності хмар. Джерело Д<sub>65</sub> створює денне світло у більш широкій області спектра, ніж С і відрізняється від нього вищою потужністю УФ-випромінення, що суттєво для правильної оцінки властивостей люмінесціючих матеріалів.

Коли взяти до уваги, що визначення коефіцієнтів пропускання і відбиття (інтегральних чи спектральних) може відноситися до ультрафіолетової, видимої чи інфрачервоної областей спектра, що умови до точності результатів часто високі, що вимірювати приходиться як дуже малі, так і великі коефіцієнти, що розміри зразків, параметри яких слід виміряти, можуть бути самими різними, то сукупність прийомів, якими при цьому користуються, дуже велика.

Вимірювання коефіцієнта відбиття зразка, який не пропускає випромінення, є одночасно вимірюванням і коефіцієнта поглинання, оскільки

$$\alpha = 1 - \rho.$$

При вимірюванні оптичних характеристик тіл слід відрізнити коефіцієнти направленого і дифузного пропускання та відбиття. Якщо індикатриса випромінення не може бути представлена підсумком направленого й дифузного пропускання, то оптичні властивості тіл характеризуються коефіцієнтом яскравості по різних напрямках.

## 9.1 Вимірювання коефіцієнта дзеркального відбивання

Схема вимірювання інтегрального коефіцієнта відбивання дзеркального зразка має просту схему і представлена на рисунку 9.1. Джерело  $I$  знаходиться всередині освітлювача  $Ос$  і направляє через отвір  $О$  пучок променів, які падають на світлочутливу поверхню фотоелемента  $ФЕ$ , замкненого на гальванометр  $ИП$ , внутрішній опір якого малий у порівнянні з внутрішнім опором фотоелемента. Регулюючи потужність пучка променів, добиваються значення гальванометра в 100 поділок. Зберігаючи постійною потужність пучка променів, на їх шляху встановлюють дзеркало  $З$  так, щоб пучок падав на нього під заданим кутом. Фотоелемент переносять в нове положення і стежать за тим, щоб відбитий пучок променів повністю вкладався на його світлочутливій поверхні. Стрілка гальванометра при цьому покаже значення інтегрального коефіцієнта відбиття у відсотках.

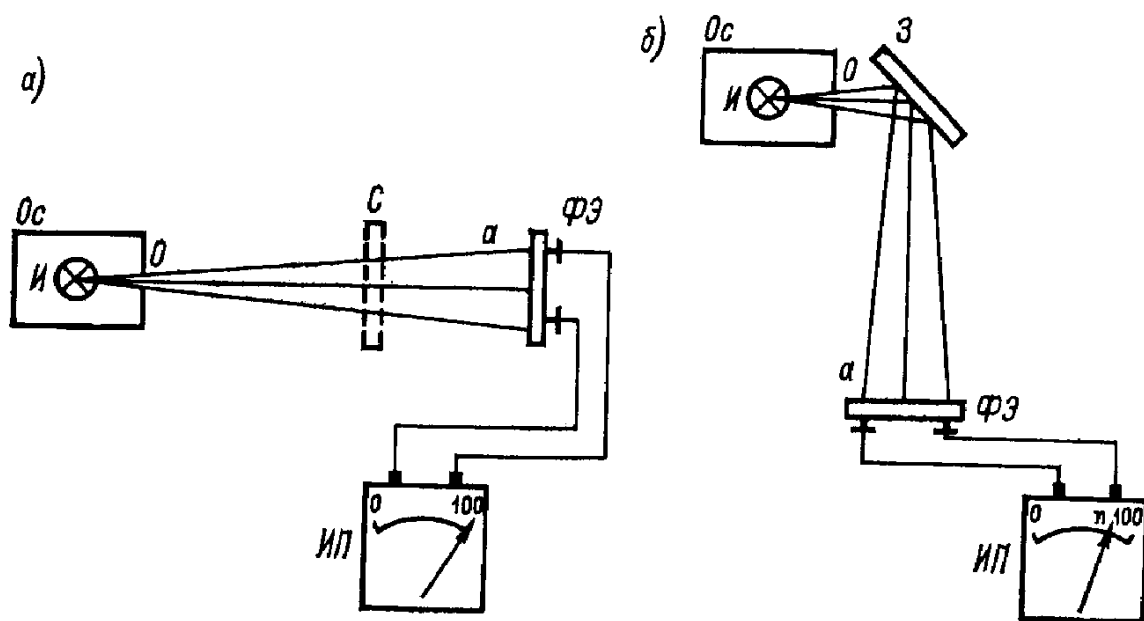


Рисунок 9.1 – Схема вимірювання інтегрального коефіцієнта відбивання дзеркального зразка

Складністю цієї процедури є необхідність переміщення вимірювального пристрою у процесі вимірювання, що створює деяку незручність і може допустити невизначеність у результатах вимірювання. Але простота

вимірювання за такою схемою дозволяє широко використовувати її в лабораторній практиці. При цьому слід виконувати деякі прості правила:

1. Кут падіння світла від джерела на зразок повинен складати  $45^\circ$ , кут падіння відбитого від зразка світла повинен надходити на приймач і дорівнювати  $45^\circ$ .

2. Необхідно слідкувати, щоб чутливість приймача була однаковою по всій його поверхні.

3. При застосуванні люксметра чи фотоелектричного приймача випромінювання необхідно стежити, щоб відстані від джерела до приладу залишалися постійними за величиною ( $a = b + c$ ) (рис. 9.2).

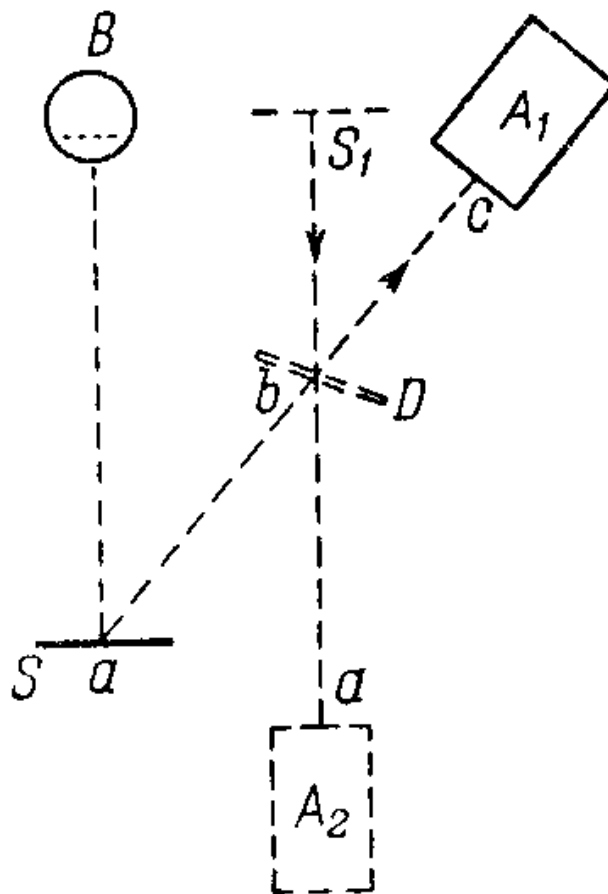


Рисунок 9.2

Якщо досліджуваний зразок, для якого вимірюється коефіцієнт відбивання, має оптичні дефекти (скривлення) або вкраплення, то при вимірюванні виникають похибки, які можна усунути, якщо використовувати в якості джерел рівномірні протяжні світні поверхні. Одним із способів є використання білої

матової випробувальної пластівки з великим значенням коефіцієнта відбиття, що забезпечує постійність яскравості по різних напрямках і коефіцієнт яскравості не змінюється до кутів падіння  $80 - 85^\circ$ . Джерело світла освітлює білу матову випробувальну пластинку. Вимірюється освітленість  $E_0$  випробувальної пластини світловимірним приладом від прямих променів джерела світла. Потім встановлюють досліджуваний зразок, пересувають вимірний прилад (наприклад, люксметр) і знову вимірюють освітленість

$E_p$ . Коефіцієнт відбивання визначається так 
$$\rho = \frac{E_p}{E_0}.$$

У заводських умовах коефіцієнт дзеркального відбиття може вимірюватися переносним приладом, наприклад фотометром ФЗ-65. Цей фотометр призначений для вимірювання коефіцієнта дзеркального відбиття у видимій частині спектра малих ділянок плоских і криволінійних дзеркальних поверхонь. Вимірювання здійснюється на готових виробах, не пошкоджуючи їх.

Вимірвальна схема фотометра ФЗ-65 наведена на рисунку 9.3. Світло від лінзи з концентрованим тілом розжарення (1) попадає в оптичну систему (лінзи (2), (4) й діафрагма (3)), яка фокусує тіло розжарення лампи на площину вихідного отвору накінецьника оптичного блоку. До останнього прикладають дослідну поверхню (5), на яку проєктується світлова пляма. Пучок променів, що відбивається від випробувальної поверхні, через діафрагму (6) і матоване скло (7) падає на фотоелемент (8), фотострум якого реєструється вимірним блоком. У вимірний ланцюг приладу потенціометром включений недротовий змінний опір (9), який забезпечує плавне регулювання відліку в межах шкали вимірального блоку.

Вимірювання проводять методом порівняння дослідної поверхні із зразковою. Перед кожною серією вимірювань робиться градування шкали вимірального блока у відсотках. Сила світла лампи 1 регулюється реостатом (10). Ввімкнення приладу виконують кнопкою (11). Похибка вимірювання складає 5 %.



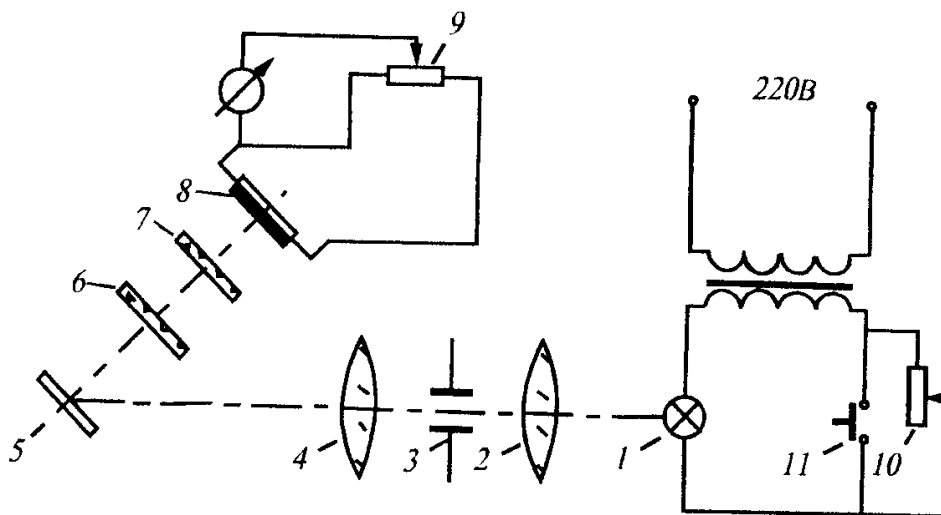


Рисунок 9.3 – Вимірювальна схема дзеркального фотометра ФЗ-65

## 9.2 Вимірювання коефіцієнта відбиття дифузно розсіюючих зразків

Вище запропоновані прості способи вимірювання, які не підходять для вимірювання коефіцієнта відбиття дифузно розсіюючих зразків. У даному випадку слід зібрати всі промені, які розсіяні в просторі. Класичним прикладом є використання кулі Тейлора, яка служить інтегруючим пристроєм. Яскравим представником такого приладу є фотометр відбиття ФО-1.

### 9.2.1 Фотометр відбиття ФО-1

Фотометр відбиття ФО-1 застосовують для вимірювання оптичних характеристик дифузних, дзеркальних і дзеркально-дифузних зразків.

Фотометр широко використовується у текстильній, целюлозній, авіаційній та інших галузях промисловості, де за коефіцієнтами відбиття ( пропускання ) визначається якість продукції.

Вимірювання можуть проводитися в декількох ділянках спектра в діапазоні: 364 – 927 нм за рахунок 12 світлофільтрів. Світлофільтр з довжиною хвилі 467 нм використовується для вимірювання білизни паперу, борошна та ін.

### 9.2.2 Будова і принцип роботи фотометра

В основу роботи фотометра з вимірювання оптичних коефіцієнтів покладено метод Тейлора.

Пучок світла певної довжини хвилі направляється через отвір сфери на внутрішню стінку фотометра, де після багаторазових відбиттів створює освітленість  $E_0$ . Потім цей же пучок променів направляється на поверхню вимірювального зразка, який щільно притиснутий до робочого отвору у сфері. Відбитий від поверхні зразка світловий потік за рахунок багаторазового відбиття створює освітленість  $E_1$ . Відношення освітленостей  $\frac{E_1}{E_0}$  дасть абсолютний коефіцієнт відбиття вимірюваного зразка.

Оптична схема фотометра наведена на рисунку 9.4. Випромінювання від джерела (1) попадає на конденсор (2), який переносить зображення джерела у площину польової діафрагми (3). Польова діафрагма усуває вплив блисків колби джерела світла. Далі світловий пучок проходить через змінну діафрагму (4), зображення якої за допомогою об'єктиву (5) й дзеркала (10) переноситься у площину вимірювального зразка (11).

Світло, розсіяне у сфері, надходить на приймач випромінювання (15), (16) через вікна, закриті молочним склом (14), (17).

У разі вимірювання коефіцієнта пропускання зразків, які дифузно розсіюють світло (7), вводять екран (9), який запобігає надходженню прямої складової випромінювання від зразка на приймач.

При вимірюванні спектральних значень оптичних коефіцієнтів застосовують кольорові світлофільтри (6). Дзеркало (13) встановлене для спостереження за положенням зразка.

Слід зазначити, що всі внутрішні елементи, як і поверхня сфери, повинні бути рівномірно пофарбовані білою світлорозсіювальною фарбою, яка б не змінювала спектрального складу випромінювання.

Предметний столик для зразків відбиття фарбують чорною матовою фарбою із сторони зразка, якщо він частково пропускає світло.

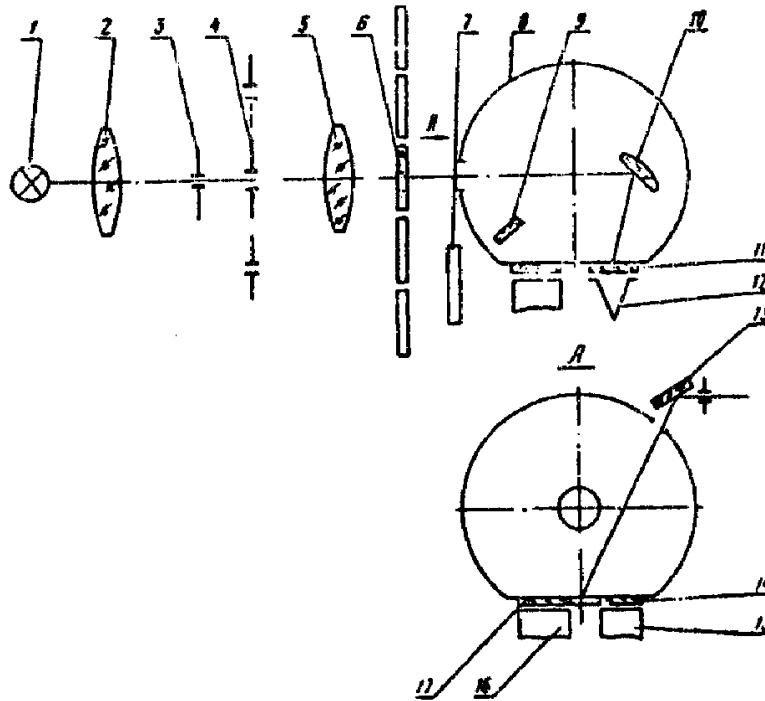


Рисунок 9.4 – Оптична схема фотометра

### 9.3 Вимірювання коефіцієнта направленого пропускання

Для вимірювання коефіцієнта направленого пропускання різних прозорих і непрозорих матеріалів можуть використовуватися фотометричні прилади. Вимірювання при цьому зводиться до того, що в пучок променів, який виходить з джерела, вводять досліджуваний зразок і співвідносять його до потоку променів, який виходить з джерела:

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi_0} \quad (9.2)$$

Коефіцієнт пропускання залежить від довжини шляху світла в зразку, тому пучок повинен бути близьким до паралельного, а зразок мати плоско паралельну форму.

Методика проведення експерименту дуже проста (рис. 9.5). Випромінення від джерела направляється на фотоелемент, вимірюється реакція приймача на потік, який впав на фотоелемент  $i_1$ , потім на шляху проходження випромінення встановлюється досліджуваний зразок і вимірюється реакція приймача на випромінення, що пройшло крізь зразок  $i_2$ .

Розрахунок значення коефіцієнта пропускання виконують за формулою

$$\tau = \frac{i_1}{i_2}.$$

При вимірюванні слід стежити, щоб потоки випромінення при експерименті не змінили свого розподілу. Для вимірювання інтегральних коефіцієнтів пропускання приймач випромінення повинен бути неселективним.

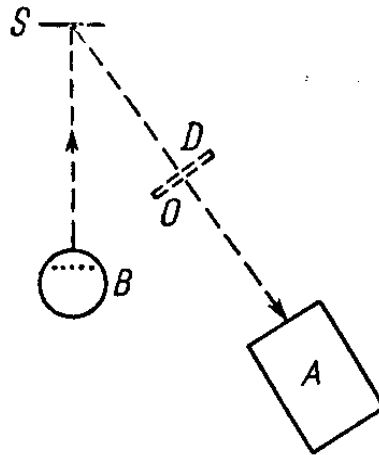


Рисунок 9.5

Якщо досліджуваний зразок, для якого вимірюється коефіцієнт пропускання, має оптичні дефекти (скривлення) або вкраплення треба також використовувати в якості джерел рівномірні протяжні світляні поверхні. Джерело світла освітлює білу матову випробувальну пластину. Вимірюється освітленість  $E_0$  випробувальної пластини світловимірним приладом від прямих променів джерела світла. Потім на шляху випромінення встановлюється досліджуваний зразок і знову вимірюється освітленість  $E_\tau$  випробувальної пластини. Коефіцієнт пропускання визначається так:

$$\tau = \frac{E_\tau}{E_0}. \quad (9.3)$$

#### 9.4 Вимірювання коефіцієнта дифузного пропускання

За допомогою фотометричної кулі можна провести вимірювання загального коефіцієнта пропускання. Для цих цілей також можна використати фотометр відбиття ФО - 1. Досліджуваний зразок розміщують на предметному

столі (7) (рис.9.4) і проводять вимірювання освітленості внутрішньої поверхні кулі, що встановилась в результаті багаторазових відбиттів  $E_{\text{мко}}$ . Прилад дає змогу одержувати значення коефіцієнта пропускання у відсотках.

### 9.5 Вимірювання коефіцієнта яскравості

Для характеристики розподілу світлового потоку в просторі, відбитому різними матеріалами, користуються поняттям коефіцієнта яскравості. Під коефіцієнтом яскравості світлорозсіювальної поверхні розуміють співвідношення яскравості цієї поверхні в деякому напрямку до яскравості ідеального розсіювача, з коефіцієнтом відбиття, рівним одиниці при тих самих умовах освітлення і під тим самим кутом спостереження.

Коефіцієнт яскравості поверхні залежить від стану поверхні, кута падіння променів і кута спостереження.

Коефіцієнт яскравості може бути виміряний різними способами.

1. За допомогою яскравоміра вимірюють яскравість зразка при певних умовах освітлення  $L_x$ . Потім на її місце встановлюють пластину з відомим коефіцієнтом яскравості  $r_0$  при тих самих умовах освітлення і спостереження. Після вимірювання яскравості зразкової поверхні  $L_0$  визначають коефіцієнт яскравості зразка за формулою:

$$r_x = r_0 \left( \frac{L_x}{L_0} \right) . \quad (9.4)$$

2. За допомогою яскравоміра роблять вимірювання яскравості у заданих напрямках. Далі за допомогою люксметра можна виміряти освітленість пластини чи розрахувати її за допомогою відомих параметрів джерела світла. Подальше коефіцієнт яскравості можна розрахувати за формулою:

$$r_x = \pi \left( \frac{L_x}{E} \right) \quad (9.5)$$

3. Якщо є універсальний фотометр або спеціальні прилади для вимірювання білості, можна безпосередньо проводити пряме вимірювання коефіцієнта яскравості.

При використанні гоніофотометричних пристроїв можна зробити вимірювання, розрахунок і побудову індикатрис коефіцієнтів яскравості. Індикатриса коефіцієнтів яскравості характеризує блиск матеріалу, тобто відносну величину спрямованої складової відбитого світла, що дозволяє конструювати світлові прилади з оптимальними світлотехнічними параметрами.

Вивчення закономірностей зміни коефіцієнтів яскравості залежно від напрямку падіння світлового потоку відіграє важливу роль при розробці різноманітних світлотехнічних матеріалів, які мають велике значення при виготовленні світлосигнальних дорожніх знаків, які сприяють безпеці руху на автомобільних трасах, дорогах тощо.

## ТЕМА 10 ОПТИЧНА ПІРОМЕТРІЯ

Температура фізичного тіла є важливим параметром, що визначає стан речовини та інші його властивості. Є багато способів і методів кількісної оцінки температури. Сукупність методів вимірювання температур, в основу яких покладені властивості випромінення, називається оптичною пірометрією.

### 10.1 Оптичні методи визначення температури тіла

Кожне тіло, температура якого відрізняється від абсолютного нуля, випускає електромагнітне випромінення, яке називається тепловим або температурним.

Випромінення тіл, що знаходяться при кімнатній температурі, практично випромінюється в інфрачервоній і радіочастотних областях спектра. Якщо температуру тіла значно збільшити, то воно починає світитися, тобто випромінювати у видимій області спектра. Тіло, що випромінює, охолоджується. Для того, щоб температура випромінюючого тіла залишалась незмінною, необхідно поповнити збиток його енергії.

Всі раніше доведені закони теплового випромінення застосовуються тільки для опису випромінення чорного тіла, а саме: закони Стефана – Больцмана, Вина, Планка тощо.

Чорні тіла – це ідеалізація реальних тіл, в навколишній природі, що нас оточує, вони практично не зустрічаються. Всі реальні тіла випромінюють теплове випромінення, властивості якого не описуються функцією Планка.

Теплове випромінення реального тіла крім температури визначається родом тіла і станом його поверхні. Тому для визначення спектральної щільності світимості  $m_\epsilon(\lambda, T)$  користуються функцією спектральної щільності енергетичної світимості чорного тіла  $m_{es}(\lambda, T)$  і експериментально визначеним значенням спектрального коефіцієнта теплового випромінення реального тіла  $\epsilon(\lambda, T)$ .

Таким чином

$$m_\epsilon(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) m_{es}(\lambda, T). \quad (10.1)$$

Тобто для того, щоб визначити істинну температуру тіла за його випроміненням, необхідно знати інтегральні й спектральні значення коефіцієнтів випромінення.

У наш час добре вивчені закони випромінення чорного тіла, які при даній температурі дають змогу розрахувати характеристики випромінення чорного тіла. Досить складною роботою є визначення високої температури нагрітих металів, яка вимірюється шляхом оцінки випромінення, що випромінюється нагрітим металом. Для таких вимірів застосовується прилад, який називається пірометром.

**Пірометр** – це прилад, який служить для вимірювання температури нагрітих тіл за інтенсивністю їх теплового випромінення в оптичній області спектра.

## 10.2 Еквівалентні температури

Для порівняння характеристик випромінення реального тіла і чорного випромінювача користуються методом еквівалентних температур.

Цей метод полягає у визначенні температури чорного тіла за умови еквівалентності однієї з характеристик його випромінення з випроміненням реального тіла при його істинній температурі. Характеристики випромінення, на підставі яких проводяться порівняння, наступні:

- щільність потоку випромінення (енергетична світимість)  $M_e$ ;
- яскравість випромінення у вузькій області спектра на довжині хвилі  $\lambda = 665 \text{ нм}$  ( $L_{\lambda}$ );
- колір випромінення, що визначається формою кривої спектральної щільності випромінення на зоровій ділянці спектру.

**Еквівалентною** температурою називають таку температуру чорного тіла, при якій одна з характеристик його випромінення співпадає з аналогічною характеристикою реального тіла при його істинній температурі.

Існують три види еквівалентних температур: радіаційна, яскравісна й колірна.



## 10.3 Радіаційний пірометр

### 10.3.1 Радіаційна (енергетична) температура

**Радіаційна (енергетична) температура**  $T_e$  - це температура чорного тіла, при якій його енергетична світимість дорівнює енергетичній світимості досліджуваного реального тіла при його істинній температурі  $T_{\text{іст}}$ .

Енергетична світимість реальних тіл при заданій температурі визначається через енергетичну світимість чорного тіла таким чином:

$$M_{\text{ет}} = \varepsilon_T M_{\text{ест}} = \varepsilon_T \sigma T^4 \quad (10.2)$$

$$\text{Тоді} \quad T_{\text{іст}} = \frac{T_p}{\sqrt[4]{\varepsilon_T}}. \quad (10.3)$$

Слід зазначити, що істинна температура завжди більше ніж радіаційна тому, що для реальних тіл значення коефіцієнта теплового випромінення  $\varepsilon_T$  менше одиниці.

Прилад, що дає змогу виміряти температуру тіла за тепловою дією його повного випромінення, називається пірометром повного випромінення, або радіаційним пірометром.

### 10.3.2 Принцип дії радіаційного пірометра

**Радіаційний пірометр** складається з телескопа і гальванометра 7 (рис. 10.1), металевого кожуха (1), в якому розміщено приймач випромінення (2 - термостовпчик або термопара), активний спай якого припаяний до поглинаючої металевої пластинки. Пластинка покрита речовиною з високим коефіцієнтом поглинання (платинова чернь, сажа). Лінза об'єктиву (3) збирає потік випромінення і фокусує його на металевій пластині (2). Фільтр (5) служить для захисту ока спостерігача від випромінення великої яскравості. Лінза окуляра (6) забезпечує наведення пірометра на об'єкт дослідження.

Перед початком роботи пірометр слід градуювати по випроміненню чорного тіла.

Випромінення, що падає на приймач пірометра, призводить до нагріву термоелемента (термостовпчика або термопари), внаслідок чого виникає термо ЕРС, яка фіксується гальванометром.

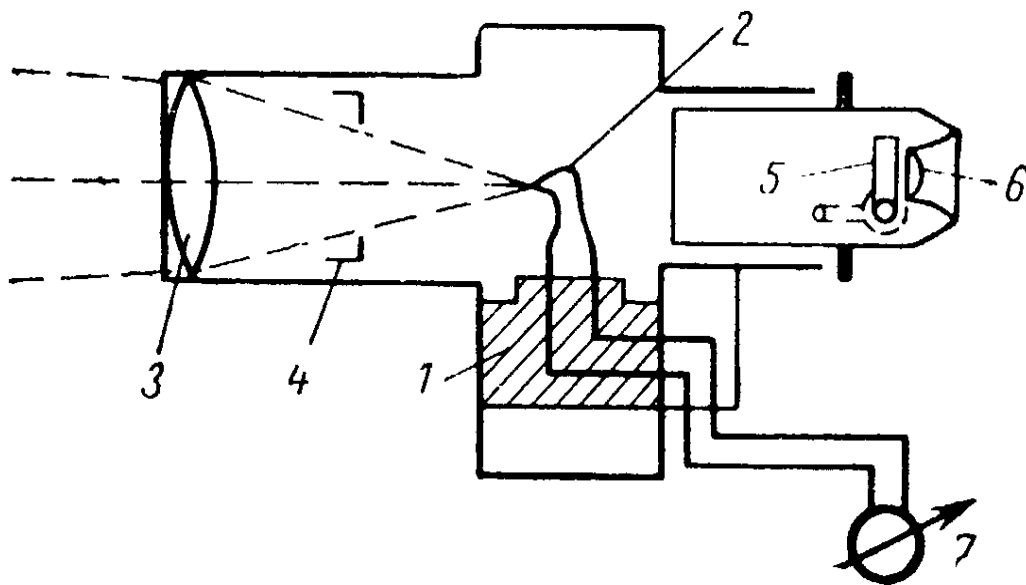


Рисунок 10.1 – Радіаційний пірометр

Для того, щоб величина тілесного кута розповсюдження випромінення не змінювалась під час вимірів при різних умовах спостереження об'єкта дослідження, між термоелементом (2) і лінзою (3) об'єктиву встановлюють діафрагму (4).

### 10.3.3 Методика вимірювання радіаційної температури

1. Проводять градування пірометра по випромінюванню чорного тіла і знаходять залежність величини струму пірометра від значення радіаційної температури. Для цього на відстані від пірометра розміщують джерело випромінення (лампа порівняння), для якого точно відомі співвідношення між напругою її живлення і значенням температури.

2. Будують криву залежності величини струму пірометра від значення радіаційної температури.

3. Встановлюють досліджуване джерело випромінення у те саме місце, де знаходилася лампа порівняння і при номінальній напрузі живлення вимірюють значення струму.

Таблиця 10.1 – Залежність енергетичної ( радіаційної) температури від напруги живлення лампи

$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$
$T_{p1}, \text{К}$	$T_{p2}, \text{К}$	$T_{p3}, \text{К}$
$I_{п1}, \text{А}$	$I_{п2}, \text{А}$	$I_{п3}, \text{А}$

4. За побудованим графіком (п. 2) знаходять значення радіаційної температури досліджуваного джерела випромінення від значення струму.

5. Для знаходження істинної температури треба виконати розрахунок за формулою (10.3)

Недоліками радіаційного пірометра для дослідження температури є:

1. Коефіцієнт поглинання пластинки залежить від способу її виготовлення і змінюється від температури випромінювача. При вимірюванні температури від  $1000^0 \text{С}$  до  $2500^0 \text{С}$  похибка вимірювання складає 0,6 %.

2. Відсутня чітка пропорційність між відхиленням гальванометра та чисельністю поглинутої енергії, що надійшла на термоелемент пірометра. Існує невраховуване поглинання потоку випромінення газами  $\text{CO}_2$  і  $\text{CO}$ , а також парами води, що знаходиться у повітрі між випромінювачем і приймачем.

3. Наявність лінзи вносить похибку, тому - що коефіцієнт поглинання її зростає з підвищенням температури випромінення.

4. При використанні радіаційного пірометра слід пам'ятати про його інерційність, що складає близько 7–15 хв.

## 10.4 Яскравісні пірометри

### 10.4.1 Яскравісна температура

**Яскравісна температура** – це температура чорного тіла, при якій його яскравість в області довжини хвилі  $\lambda = 665 \text{ нм}$  дорівнює яскравості досліджуваного зразка реального тіла в тій же області спектра при його істинній температурі.

Для визначення реальної температури тіла треба знайти зв'язок істинної температури з яскравісною. Для цього користуються законом Вина для спектральної щільності світимості:

$$m_{\text{ес}}(\lambda T) = C_1 \lambda^{-5} e^{c_2/\lambda T_{\text{я}}}; \quad (10.4)$$

Враховуючи умови еквівалентності яскравості випромінення вузької області спектра, які визначають співвідношення яскравісної і реальної температур, встановлюють рівноцінні і еквівалентні спектральні щільності випромінення.

$$m_{\text{ес}}(\lambda T) = V(\lambda) C_1 \lambda^{-5} e^{c_2/\lambda T_{\text{я}}}; \quad (10.5)$$

$$m_{\text{е}}(\lambda T) = \varepsilon(\lambda, T) V(\lambda) C_1 \lambda^{-5} e^{c_2/\lambda T_{\text{п}}}; \quad (10.6)$$

$$V(\lambda) C_1 \lambda^{-5} e^{c_2/\lambda T_{\text{я}}} = \varepsilon(\lambda, T) V(\lambda) C_1 \lambda^{-5} e^{c_2/\lambda T_{\text{п}}}; \quad (10.7)$$

$$e^{c_2/\lambda T_{\text{я}}} = \varepsilon(\lambda, T) e^{c_2/\lambda T_{\text{п}}}. \quad (10.8)$$

Взявши логарифм обох частин рівняння і помноживши їх на множник  $\lambda/C_2$ , отримаємо:

$$\frac{1}{T_{\text{іст}}} - \frac{1}{T_{\text{я}}} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon(\lambda, T), \text{ або } T_{\text{іст}} = \frac{C_2}{\lambda} \cdot \frac{1}{\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}} + \ln \varepsilon(\lambda, T_{\text{іст}})}. \quad (10.9)$$

Яскравісна температура завжди менша за реальну. Температуру тіла можна знайти за абсолютним значенням випромінюючої здатності для даної довжини хвилі методом порівняння з еталонним джерелом випромінення. Це порівняння здійснюється за допомогою яскравісного пірометра із зникаючою ниткою.

Яскравісну температуру можна виміряти на будь-якій довжині хвилі, але звичайно це 665 нм, що дозволяє знизити межу яскравісної температури до 600–700 °С.

#### 10.4.2 Пірометр із зникаючою ниткою

Для вимірювання яскравісної температури користуються оптичним пірометром із зникаючою ниткою. Він складається з телескопа, джерела живлення, лампи порівняння і амперметра.

Схема пірометра наведена на рисунку 10.2.

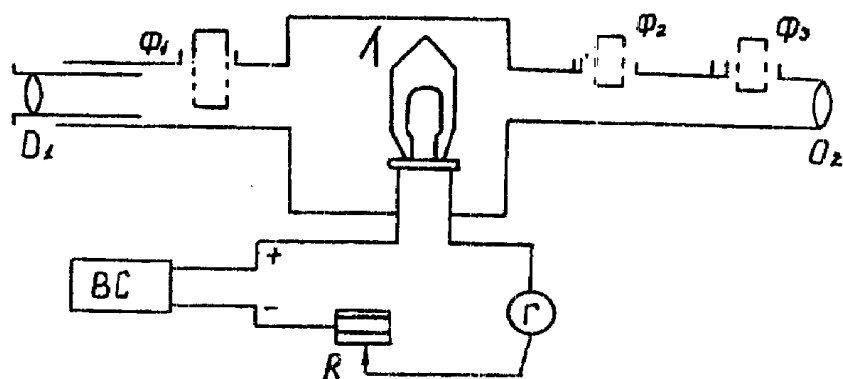


Рисунок 10.2 – Візуальний яскравісний пірометр із зникаючою ниткою

У корпусі телескопа розташовані лінзи  $O_1$ , лампа порівняння  $L$ , реостат  $R$ , червоний світлофільтр  $\Phi_1$ , який пропускає випромінення вузької області спектра, що лежить в межах 665 нм, касета служить для розташування нейтральних світлофільтрів  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$ , які вводяться при великій яскравості тіла, температуру якого треба визначити, окуляр  $O_2$  служить для наведення на об'єкт і створення чіткого зображення нитки розжарення лампи порівняння. У ланцюг лампи включено амперметр.

При підготовці пірометра до роботи обертанням ручки вводять червоний світлофільтр  $\Phi_1$  і шляхом пересування окуляра добиваються чіткого зображення нитки розжарення лампи порівняння  $L$ . Змінюючи реостатом  $R$  напругу живлення лампи порівняння, добиваються рівняння яскравості нитки й зображення тіла, яскравісна температура якого вимірюється. Для поширення межі вимірювання температури в пірометрах із зникаючою ниткою передбачені нейтральні світлофільтри, що розташовані в касеті.

Градуювання пірометра із зникаючою ниткою проводиться за джерелом, яскравісна температура якого відома.

#### 10.4.3 Методика вимірювання яскравісної температури

1. На штативі встановлюють еталонне джерело випромінення з відомими значеннями яскравісної температури залежно від величини напруги живлення.
2. Проводять градування пірометра, для чого його направляють об'єктивом на еталонне джерело. Вводять червоний світлофільтр і добиваються

чіткого зображення нитки розжарення еталонної лампи за допомогою пересування об'єктива.

3. Окуляром добиваються чіткого зображення U - нитки лампи порівняння, яка знаходиться всередині пірометра.

4. Зміщують разом U- нитку лампи порівняння та досліджену ділянку еталонної лампи.

5. Регулюючи реостатом струм в ланцюзі, добиваються рівняння яскравості обох об'єктів. При цьому U - нитка лампи порівняння пірометра ніби зникає на фоні об'єкта, що і дало назву пірометру.

6. Зміна напруги живлення еталонної лампи в заданому діапазоні призводить до зміни температури тіла еталонної лампи. Для заданих значень напруги виконують вимірювання струму пірометра, як сказано в п. 5.

7. Будують градуирований графік залежності яскравісної температури від струму пірометра.

Таблиця 10.2 – Залежність яскравісної температури від напруги живлення лампи

$U_{п1}, В$	$U_{п2}, В$	$U_{п3}, В$
$T_{я1}, К$	$T_{я2}, К$	$T_{я3}, К$
$I_{п1}, А$	$I_{п2}, А$	$I_{п3}, А$

8. На штативі в те саме місце встановлюють досліджуваний об'єкт.

9. Пірометр наводять на об'єкт дослідження, добиваються чіткого зображення досліджуваної ділянки джерела випромінення за допомогою об'єктива і регулюючи реостатом струм в ланцюзі пірометра, добиваються умов рівняння яскравості U - нитки тіла розжарення лампи порівняння пірометра і досліджуваного джерела. Записують значення струму пірометра  $I_{п}$  (А) при цих умовах.

10. За градуїованим графіком визначають величину яскравісної температури досліджуваного зразка і проводять розрахунок істинної температури реального тіла за формулою (10.9).

$$C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ м К.}$$

#### 10.4.4 Фотоелектричні яскравісні пірометри

У візуальних яскравісних пірометрах результати вимірювань залежать від суб'єктивних помилок спостерігача. Крім цього візуальними пірометрами не можна автоматично контролювати температуру. Цих недоліків не мають фотоелектричні яскравісні пірометри. Блок-схема простого фотоелектричного яскравісного пірометра показана на рисунку 10.3.

Світло від вимірюваного джерела  $S$  через лінзу  $O$  і фільтр  $T$  надходить на фотоелемент  $\Phi$ . Фотострум, що виникає в ланцюзі, посилюється підсилювачем  $У$  і поступає на реєструючий прилад РП.

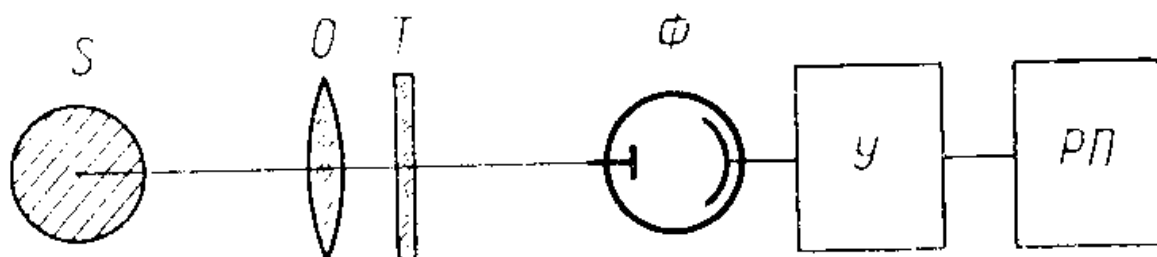


Рисунок 10.3 – Блок-схема яскравісного фотоелектричного пірометра

Фотоелектричний яскравісний пірометр типу ФЕП-3 призначений для вимірювання і запису яскравісної температури металу в процесі прокатки. У пірометрі використовується вузька спектральна область випромінювання від 0,6 до 0,7 мкм.

Пірометр типу ФЕП-3 має п'ять діапазонів вимірювання (600–1 100 °С, 800–1300 °С, 900–1 400 °С, 1 000–1 700 °С та 1 100–1 800 °С.) Основна похибка вимірювання складає 1% від верхнього поділу приладу.

Недоліком оптичної пірометрії, в якій використовується випромінення, що лежить у видимій області спектра, є неможливість вимірювання температур нижче 700–800 °С. Однак цей недолік зменшується при використанні інфрачервоного випромінення, що дозволяє значно знизити нижню межу вимірюваних температур.

## 10.5 Колірні пірометри

### 10.5.1 Колірна температура

**Колірна температура** ( $T_{\text{кол}}$ ) - це температура чорного тіла, при якій колір його випромінення співпадає з кольором досліджуваного тіла при його істинній температурі. Якщо криві спектральної щільності енергетичної світимості двох тіл у видимій області спектра співпадають або подібні, то їхнє випромінення має однаковий колір.

Для джерел світла із суцільним спектром колірну температуру можна визначити з рівняння

$$\frac{m_{es}(\lambda_1 T_k)}{m_e(\lambda_1 T_{icT})} = \frac{m_{es}(\lambda_2 T_k)}{m_e(\lambda_2 T_{icT})}, \quad (10.11)$$

або

$$\frac{m_{es}(\lambda_1 T_k)}{m_{es}(\lambda_2 T_k)} = \frac{m_e(\lambda_1 T_{icm})}{m_e(\lambda_2 T_{icm})}.$$

Згідно з рівнянням Вина,  $m_{es} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (10.12)$

Тоді 
$$\frac{C_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T_k}}}{C_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T_k}}} = \frac{\varepsilon(\lambda_1 T_{icm}) C_1 \lambda_1^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_1 T_{icm}}}}{\varepsilon(\lambda_2 T_{icm}) C_1 \lambda_2^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda_2 T_{icm}}}}; \quad (10.13)$$

Після скорочення і логарифмування обох сторін рівняння, вирішуючи відносно  $T_{icT}$ , одержимо:



$$\frac{1}{T_{icm}} = \frac{1}{T_{\kappa}} - \frac{\ln \frac{\varepsilon(\lambda_1 T_{icm})}{\varepsilon(\lambda_2 T_{icm})}}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}. \quad (10.14)$$

Якщо монохроматичні коефіцієнти випромінюючої здатності тіла на різних довжинах хвиль однакові, тобто тіло сіре, то кольорова температура дорівнює істинній. Колірна температура може бути як більше, так і менше за істинну залежно від спектрального розподілу випромінення реального тіла. Колірну температуру вимірюють у двох областях спектра  $\lambda = 665$  нм та  $\lambda = 467$  нм, тобто із червоним та синім світлофільтром. Тому такий метод називають синьо-червоним співвідношенням.

Показання колірних пірометрів не залежать від відстані до вимірюваного об'єкта, розмірів випромінюючої поверхні й оптики пірометра, що позитивно відрізняє їх від яскравісних.

Для вимірювання колірної температури можна також користуватися яскравісним пірометром, але слід застосовувати світлофільтри із смугою пропускання  $\lambda = 467$  і  $\lambda = 665$  нм.

Для проведення досліджень колірної температури часто застосовується проста фотометрична схема із використанням двох світлофільтрів – червоного та синього, селенового фотоелемента з коригуючим фільтром та амперметром.

### 10.5.2 Методика вимірювання колірної температури

1. На штативі встановлюють еталонне джерело випромінення з відомими значеннями колірної температури залежно від величини напруги живлення. Зміна напруги живлення еталонної лампи в заданому діапазоні довжини хвилі приводить до зміни кольорової температури тіла еталонної лампи.

2. Проводять градування пірометра. Для цього вводять червоний світлофільтр і вимірюють значення величини струму  $i_{\text{ч}}$  при різних значеннях напруги живлення лампи. Потім встановлюють синій світлофільтр і проводять вимір величини струму  $i_{\text{с}}$  при різних значеннях напруги живлення лампи

3. Проводять розрахунок відношення  $i_c / i_{\text{ч}}$  та будують градуйований графік залежності колірної температури від синьо-червоного співвідношення.

Таблиця 10.3 - Залежність колірної температури від напруги живлення лампи

$U_{\text{п1}}, \text{В}$	$U_{\text{п2}}, \text{В}$	$U_{\text{п3}}, \text{В}$
$T_{\text{к1}}, \text{К}$	$T_{\text{к2}}, \text{К}$	$T_{\text{як}}, \text{К}$
$I_{\text{п1}}, \text{А}$	$I_{\text{п2}}, \text{А}$	$I_{\text{п3}}, \text{А}$

4. На штативі в те саме місце встановлюють досліджуваний об'єкт. Проводять вимірювання струму в ланцюзі приймача випромінення при проходженні його через синій, а потім червоний світлофільтри.

5. Знаходять значення співвідношення  $i_c / i_{\text{ч}}$  та по градуйованою кривою графічно визначають  $T_{\text{кол}}$ .

6. Проводять розрахунок істинної температури реального тіла за відомою формулою (10.14).

Похибки колірних пірометрів значно менше, ніж яскравісних, тому що коефіцієнт випускової здатності більшості реальних тіл мало змінюється з довжиною хвилі на невеликих ділянках спектра.

На результати вимірювання колірної температури менше впливає селективність поглинаючого середовища.

### 10.5.3 Колірні пірометри

Вимірювальні схеми колірних пірометрів можуть бути одно- і багатоканальними.

В одноканальній схемі два різних монохроматичних світлових потоки за допомогою оптичного комутатора по чергово подаються на один і той же фотоелектричний приймач випромінення. Це призводить до підвищення стабільності характеристик приладу і знижує вимоги до постійної характеристики схеми й напруги живлення. При зміні характеристик електричної схеми та напруги живлення в одноканальному колірному пірометрі

одночасно змінюються величини сигналів, відповідних спектральних яскравостей.

У даний час в більшості одноканальних колірних пірометрах оптичний комутатор виконано у вигляді диску, що обертається. По периферії диску є певна кількість отворів, перекритих різними світлофільтрами, наприклад: синіми й червоними. При обертанні оптичного комутатора на фотоеlement почергово надходить випромінення різного спектрального складу, тому у вимірювальному ланцюгу формується модульований за амплітудою електричний сигнал постійної частоти. За цим принципом побудовано промисловий автоматичний фотоелектричний пірометр типу ЦЕП-3, який служить для дистанційного вимірювання і автоматичної реєстрації колірної температури поверхні розжарених і розплавлених тіл.

Спектральна чутливість застосованого приймача випромінення типу Ф-8 залежить від температури навколишнього середовища, тому його замикають у термостат з автоматичним регулюванням температури середовища.

Діапазон вимірювання температури за допомогою такого пірометра складає 1400 °С–1800 °С.

Вимірювання температури ЦЕП-3 повністю автоматизоване. Функції оператора зводяться до включення пірометра, заміни діаграмної стрічки й періодичного нагляду за роботою пірометра.

## ТЕМА 11 СПЕКТРАЛЬНІ ВИМІРЮВАННЯ

Серед різноманітних оптичних методів вимірювання випромінення оптичної області спектра особливе місце займають спектральні методи вимірювання, за допомогою яких досліджуються:

1. Спектральна щільність випромінення.
2. Спектральні оптичні характеристики тіл.
3. Спектральна й відносна спектральна чутливість приймачів випромінення.
4. Спектральні характеристики оптичних систем.
5. Колірні характеристики поверхонь.
6. Колориметричні характеристики світлофільтрів тощо.

Для виконання спектральних вимірювань застосовують спектральні прилади.

**Спектральним приладом** називається оптичний пристрій, що використовується для розкладання електромагнітного випромінення оптичного діапазону в спектр за довжинами хвиль і для вивчення цього спектра.

Під вивченням спектрів розуміють визначення залежності енергії випромінення від довжини хвилі або частоти.

Аналіз отриманого спектра можна виконувати різними методами залежно від використаного приймача випромінення.

За способом розподілу випромінення у спектр спектральні прилади діляться на призмені й дифракційні.

Блок - схема спектрального приладу наведена на рисунку 11.1.

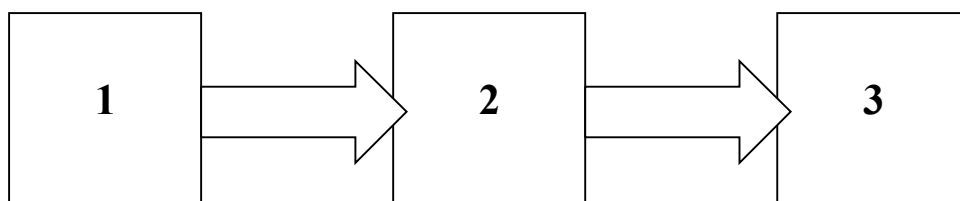


Рисунок 11.1 – Блок-схема спектрального приладу

Основні елементи спектрального приладу:

1. **Вхідний коліматор**, який складається з вхідної щілини й лінзи, причому вхідна щілина розташована на оптичній осі об'єктива коліматора в його фокальній площині, що створює на виході з лінзи паралельний пучок променів.

2. **Диспергуючий елемент** служить для розкладання електромагнітного випромінення оптичної області спектра у спектр за довжинами хвиль. В якості диспергуючої системи, як правило використовуються спектральні призми й дифракційні решітки.

3. **Вихідний коліматор** складається з камерного об'єктива і пристрою, який розташовано у фокальній площині цієї оптичної системи.

**Принцип роботи спектрального приладу** й призначення його елементів наступне. Досліджуване джерело освітлює вхідну щілину коліматора. Випромінення, що пройшло вхідну щілину надходить, на об'єктив коліматора, після чого паралельним пучком променів направляється на диспергуючий елемент, де відбувається розкладання випромінення у спектр. Причому в спектральній призмі кут відхилення залежить від довжини хвилі: чим довша хвиля, тим на менший кут відхиляється вона від нормалі (рисунок 11.2). Сукупність монохроматичних паралельних пучків променів, що виходять з диспергуючої системи, надходять у камерний об'єктив вхідного коліматора, який фокусує окремі паралельні пучки променів і створює в його фокальній площині сукупність зображень вхідної щілини в світлі різних довжин хвиль.

Геометричне місце цих зображень у фокальній площині камерного об'єктива і складає спектр випромінення, а саме положення зображень вхідної щілини у фокальній площині вихідного коліматора залежить від довжини хвилі, а їх сукупність створює фокальну площину камерного об'єктиву. Якщо в цій площині розмістити фотопластину, то вона зафіксує спектр випромінення, яке пройшло крізь прилад.

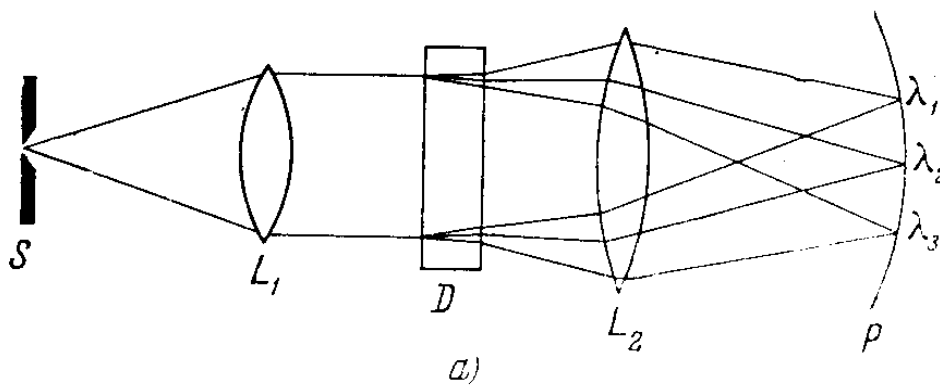


Рисунок 11.2 – Принципова схема спектрального приладу

Залежно від пристрою, який розташовано у фокальній площині вихідного коліматора, всі спектральні прилади діляться на такі види:

1. Якщо у фокальній площині вихідного коліматора розташовано окуляр для візуального спостереження спектра випромінювання, то такий спектральний прилад називається **спектроскопом**.

2. Якщо у фокальній площині вихідного коліматора розташована касета з фотошаром для фотографічної реєстрації спектра випромінювання, то такий спектральний прилад називається **спектрографом**.

3. Якщо у фокальній площині вихідного коліматора розташовано фотоелектричний приймач випромінювання для дослідження спектрів поглинання або відбиття, то такий спектральний прилад називається **спектрофотометром**.

4. Якщо у фокальній площині вихідного коліматора розташована вихідна щілина, через яку виходить тільки випромінювання в межах вузького спектрального діапазону для дослідження спектрів, то такий спектральний прилад називається **монохроматором**.

Монохроматор є найбільш розповсюдженим приладом, який є основною частиною різноманітних спектрометрів, спектрофотометрів та інших спектральних приладів.

### 11.1. Параметри спектральних приладів

Всі спектральні прилади незалежно від застосованої диспергуючої системи (спектральна призма або дифракційна решітка) мають низку загальних властивостей.

У першу чергу всі спектральні прилади характеризуються кутовою і лінійною дисперсією, реальною світлосилою, практичною дозволяючою здатністю, областю дисперсії.

Кутова й лінійна дисперсії показують, як будуть розходитися промені з різними довжинами хвиль.

У призмних спектральних приладах кут відхилення променів з різними довжинами хвиль характеризується значенням показника заломлення для даної довжини хвилі (рисунк 11.3):

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2 . \quad (11.1)$$

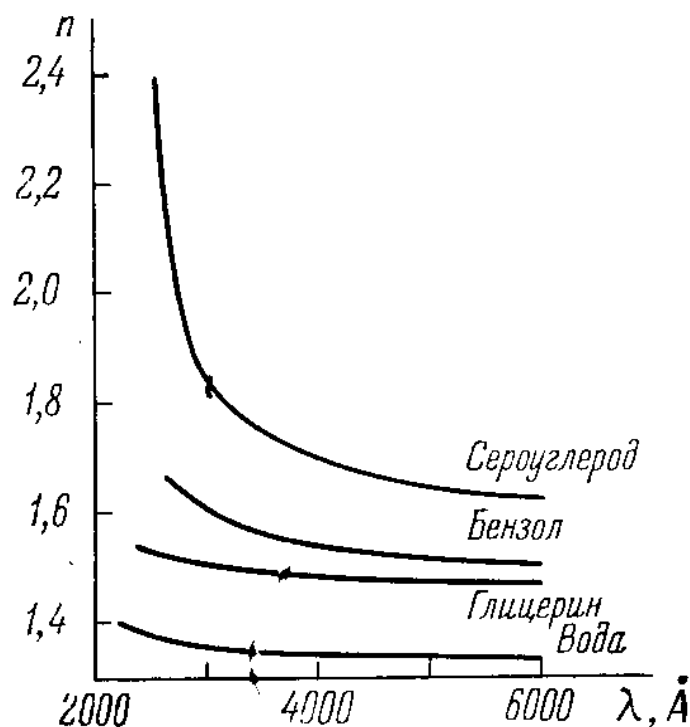


Рисунок 11.3 – Криві дисперсії деяких рідин

**Лінійна дисперсія**  $D_l$  визначається відношенням відстані у фокальній площині між двома близько розташованими спектральними лініями до різниці довжин хвиль між цими лініями (рис.11.4):

$$D_l = \frac{\partial \ell}{\partial \lambda}; \quad (11.2)$$

де  $\partial \ell$  – відстань у фокальній площині між двома близько розташованими спектральними лініями, мм,

$\partial\lambda$  – різниці довжин хвиль між двома близько розташованими спектральними лініями, нм.

Таким чином лінійна дисперсія  $D_l$  визначає лінійну відстань  $\Delta l$  між центрами монохроматичних зображень вхідної щілини відстоюючи на інтервал  $\Delta\lambda$ .

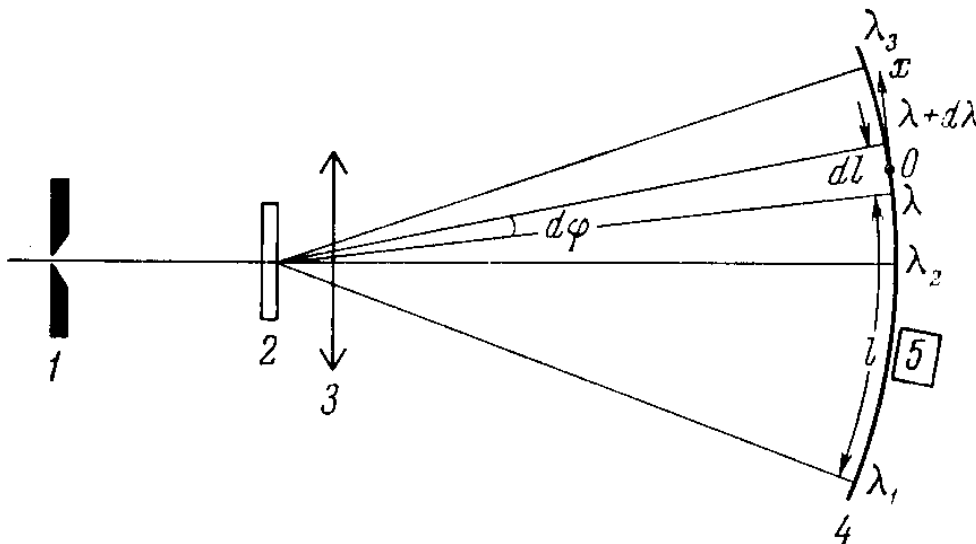


Рисунок 11.4 – Принципова схема визначення лінійної і кутової дисперсії спектрального приладу

**Кутова дисперсія**  $D_\alpha$  спектрального приладу визначається відношенням різниці кутів відхилення двох близько розташованих спектральних ліній до різниці довжин хвиль між цими лініями:

$$D_\alpha = \frac{\partial\varphi}{\partial\lambda}, \quad (11.3)$$

де  $\partial\varphi$  – різниці кутів відхилення двох близько розташованих спектральних ліній, рад.

$\partial\lambda$  - різниці довжин хвиль між двома близько розташованими спектральними лініями, нм.

Кутова дисперсія спектрального приладу визначає кут, на який диспергуюча система розділяє світлові пучки близьких довжин хвиль (рис. 11.4).



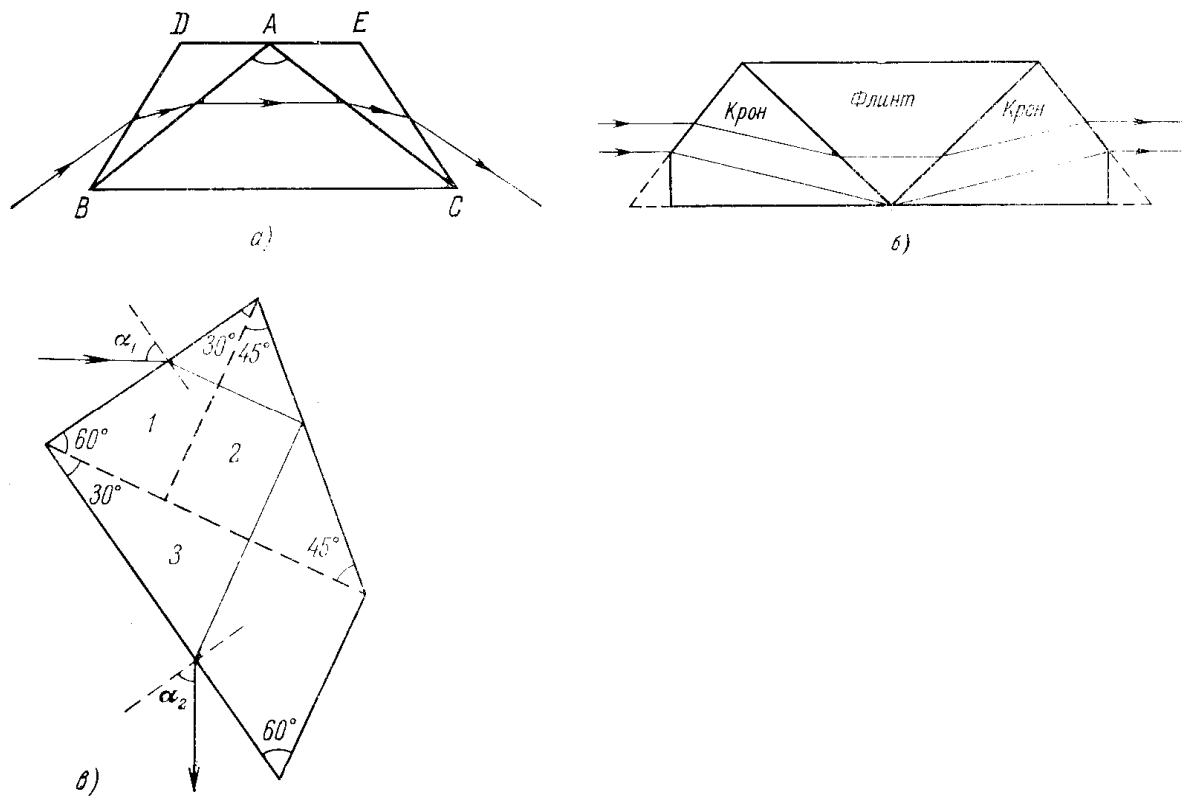


Рисунок 11.5 – Призми Резерфорда (а), Амачі (б),  
призма постійного відхилення (в)

**Областю дисперсії** спектрального приладу називають таку область довжин хвиль у спектрі, де існує однозначний зв'язок між довжиною хвилі спектральної лінії та її місцем у спектрі. Для збільшення дисперсії застосовуються призми складних форм (рис. 11.5, а, в), призми складного складу з різними показниками переломлення матеріалів (б), автоколімаційні системи, які служать для проходження пучка променів через диспергуючу систему декілька разів, що збільшує дисперсію і, відповідно, відстань між близько розташованими лініями у спектрі (рис. 11.6).

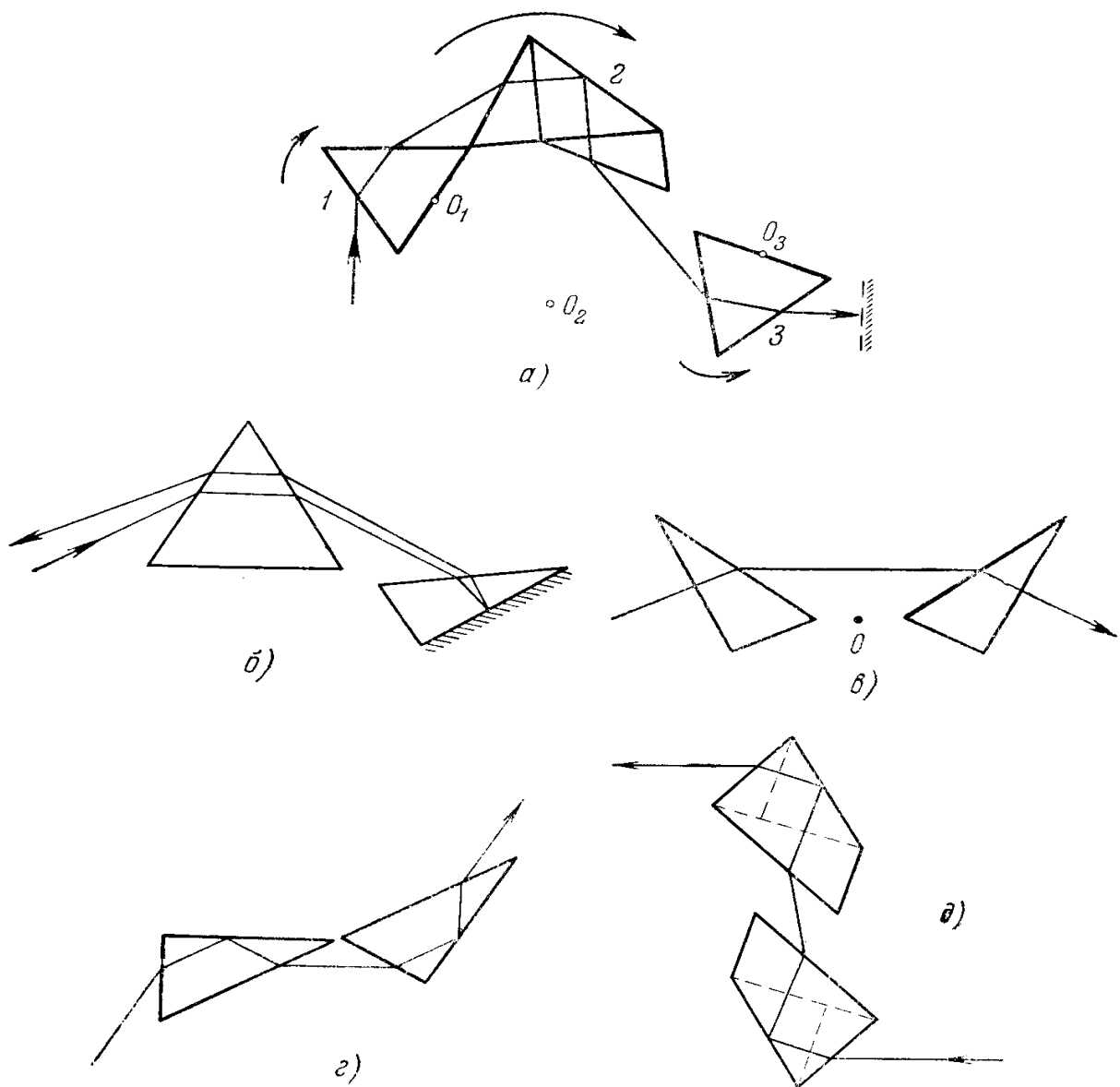


Рисунок 11.6 – Багатопризменні системи Ферстерлінга (а) та еквівалентна їй автоколімаційна система (б), системи Юнга-Толлона (в), Лева (г) і Фріша (д)

**Дозволяючою здатністю** оптичного приладу вважають здатність розрізнити в зображенні об'єкта дві близько розташовані світні точки в пересічному оптичному приладі або дві близько розташовані монохроматичні лінії у спектрі, який отримано за допомогою спектрального приладу.

Кількісною характеристикою дозволяючої здатності є величина  $R$ , яка визначається за формулою:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (11.4)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, нм,

$\delta\lambda$  – мінімальна різниця довжин хвиль  $\lambda$  і  $\lambda + \Delta\lambda$  двох близьких монохроматичних ліній в спектрі однакової інтенсивності, які ще можна розрізнити в спектрі.

## 11.2 Освітлення вхідної щілини спектрального приладу

Потік випромінювання з вихідної щілини монохроматора при освітленні вхідної щілини джерелом суцільного спектру можна визначити так:

$$\Phi = L \cdot G. \quad (11.5)$$

Якщо спектральна щільність яскравості джерела випромінювання або його зображення на вхідній щілині дорівнює  $\ell(\lambda)$ , то потік випромінювання у спектральному інтервалі  $\delta\lambda$ , що падає на коліматорний об'єктив приладу, визначається як

$$\delta\Phi(\lambda)_{\text{над}} = \ell \delta\lambda G = \ell(\lambda) \delta\lambda \frac{haA_k}{f_1^2}, \quad (11.6)$$

де  $ha$  – висота й ширина щілини;

$A_k$  – площа коліматорного об'єктива;

$f_1$  – фокусна відстань коліматорного об'єктива.

Аберації, які оптична система приладу вносить до зображення вхідної щілини, призводять до деякого «розмиття» і скривлення форми цього зображення. Крім того деяке розширення зображення дає також дифракція.

Для заданого значення спектрального інтервалу максимальний потік випромінювання пропускається монохроматором при рівних значеннях ширини вхідної й вихідної щілини. Тому коли немає будь-яких додаткових міркувань, такий режим найбільш привабливий при роботі монохроматора із джерелом суцільного спектра.

Питання про допустимість ширини щілини визначається характером досліджуваного спектра. При роботі з лінійчатим спектром ширина вихідної щілини обирається таким чином, щоб через неї пройшло все випромінювання

встановленої лінії, тому вона повинна бути ширше вхідної щілини через кінцеву спектральну ширину лінії, так і через дифракційне та абераційне розширення зображення. Можливий ще інший варіант: ширина вхідної щілини обирається більшою ніж вихідної настільки, що подальше її збільшення не приводить до росту вихідного з приладу потоку випромінення.

Потік випромінення, який виходитиме з монохроматора при лінійчатому спектрі, визначається за виразом:

$$\Phi(\lambda_i) = \ell(\lambda_i) \tau_{oc}(\lambda_i) \frac{A_k}{f^2} h a \partial \lambda, \quad (11.7)$$

де  $a$  – ширина меншої із щілин.

Пройшовши через оптичну систему монохроматора, потік буде послаблений втратами в неї на величину коефіцієнта пропускання оптичної системи приладу на заданій довжині хвилі  $\tau_{oc}(\lambda)$ .

За рахунок розкладання випромінення у спектр кожна точка зображення вхідної щілини у фокальній площині камерного об'єктива витягнеться у відрізок, довжина якого пропорційна спектральному інтервалу  $\partial \lambda$  і дисперсії приладу, яка є мірою розходження променів різних довжин хвиль.

Кутова й лінійна дисперсії пов'язані простим співвідношенням:

$$\frac{\partial \ell}{\partial \lambda} = f_2 \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}, \quad (11.8)$$

де  $f_2$  – фокусна відстань камерного об'єктива.

Таким чином, кожна точка вхідної щілини відображується у фокальній площині вихідного коліматора відрізком

$$\partial \ell = f_2 \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} \partial \lambda. \quad (11.9)$$

Вихідна щілина приладу вирізає із спектра, який лежить у фокальній площині вихідного коліматора, частину потоку випромінення  $\Phi(\lambda)$ , пропорційну ширині щілини  $a'$  і зворотно пропорційну  $\partial \ell$ :

$$\Phi(\lambda) = \partial\Phi(\lambda)_{\text{прош}} a' / \partial\ell = \ell(\lambda) \partial\lambda \tau_{\text{oc}}(\lambda) \frac{A_{\text{кол}}}{f_1^2} aa'h \frac{1}{\partial\ell}. \quad (11.10)$$

Зв'язок лінійної і кутової дисперсії, як відомо, такий:  $\partial\ell = f_2 \partial\varphi$ .

Тоді

$$\Phi(\lambda) = \ell(\lambda) \tau_{\text{oc}}(\lambda) \frac{A}{f_1^2} \frac{1}{f_2 \partial\varphi} \partial\lambda aa'h = \ell(\lambda) \tau_{\text{oc}}(\lambda) \frac{A}{f_2 f_1^2} \frac{\partial\lambda}{\partial\varphi} aa'h. \quad (11.11)$$

Відношення висоти вихідної щілини до висоти вхідної є поперечне збільшення оптичного приладу і дорівнює відношенню фокусних відстаней об'єктива:

$$\beta = \frac{h'}{h} = \frac{f_2}{f_1}; \quad (11.12)$$

Тоді:

$$h = \frac{h' f_1}{f_2}.$$

Таким чином, вихідний з монохроматора потік математично має вигляд

$$\Phi(\lambda) = \ell(\lambda) \tau_{\text{oc}}(\lambda) \frac{A}{f_2^2} \frac{\partial\lambda}{\partial\varphi} \frac{a}{f_1} a'h'. \quad (11.13)$$

Зазвичай в монохроматорах збільшення дорівнює 1, тобто:

$$\beta = 1, f_1 = f_2 = f \quad ; \quad h' = h.$$

Світловий потік, який вийде із спектрального приладу, визначається за формулою:

$$\Phi(\lambda) = \ell(\lambda) \tau_{\text{oc}}(\lambda) \frac{A}{f^2} \frac{\partial\lambda}{\partial\varphi} \frac{h}{f} aa' = \ell(\lambda) \tau_{\text{oc}}(\lambda) \frac{A}{f^2 D_\ell} haa'. \quad (11.14)$$

Світлосила спектрального приладу характеризує його фотометричні властивості і дорівнює коефіцієнту пропорційності  $\kappa$  між яскравістю джерела випромінювання і вимірюваною енергетичною величиною потоку (освітленості):

$$\Phi_e = \kappa \cdot L_e. \quad (11.15)$$

Світлосила приладу залежить від ряду геометричних та спектроскопічних параметрів спектральних приладів, величини втрат випромінення на всьому шляху від джерела до приймача випромінення, а також від методу реєстрації спектра.

Отже, коефіцієнт пропорційності між яскравістю джерела випромінення і вимірюваною фотометричною величиною називають світлосилою приладу. Відповідно до вимірюваної фотометричної величини відрізняють світлосилу за потоком і світлосилу за освітленістю.

Якщо на виході із спектрального приладу вимірюється потік випромінення, який визначається за формулою:

$$\Phi(\lambda) = \ell(\lambda)\tau_{oc}(\lambda) \frac{A}{f^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{h}{f} aa' = \ell(\lambda)\tau_{oc}(\lambda) \frac{A}{f^2 \mathcal{D}_\ell} haa', \quad (11.16)$$

то світлосила приладу за потоком

$$\kappa_\Phi = \frac{Ahaa'}{f^2 \mathcal{D}_\ell}. \quad (11.17)$$

Освітленість зображення щілини визначається, як

$$E_e(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{A_{вих}} = \frac{\Phi(\lambda)}{a'h'} = \ell(\lambda)\tau_{oc}(\lambda) \frac{aA}{f^2 \mathcal{D}_\ell}, \quad (11.18)$$

тоді світлосила приладу за освітленістю визначається так:

$$\kappa_E = \frac{Aa}{f^2 \mathcal{D}_\ell}. \quad (11.19)$$

Вирази визначення потоку випромінення, що виходить зі спектрального приладу,

$$\Phi_e(\lambda) = \ell(\lambda)\tau_{oc}(\lambda) \frac{A}{f^2 \mathcal{D}_\ell} haa' \quad (11.20)$$

були отримані за умови, коли увесь коліматор заповнено світлом, тобто повністю використовується тілесний кут :

$$\omega = \frac{A}{f^2} .$$

Виконання цих умов є бажаним з точки зору повної реалізації не тільки світлосили приладу, але і його дозволяючої здатності. Це також необхідно для правильного порівняння досліджуваних і зразкових джерел та приймачів випромінення. Якщо пучок променів менше, ніж повний переріз коліматора, то він може, залежно від положення джерела відносно приладу, проходити через різні місця призми, тобто довжина його шляху в призмі може бути різною. Отже будуть різні й втрати випромінення у призмі. Якщо навіть джерело знаходиться строго на осі , то від перерізу пучка променів залежить коефіцієнт пропускання призми, для центрального променя коефіцієнт пропускання менший ніж для сукупності променів, заповнюючих коліматор. Тільки повне заповнення коліматора світлом забезпечить однозначність коефіцієнта пропускання приладу.

Простіший приклад, при якому ці вимоги виконуються, має місце, якщо джерело досить велике за розміром і може бути встановлено досить близько до щілини, щоб увесь тілесний кут коліматора був заповнений випроміненням (рис.11.7, а ).

Якщо джерело замале і розташоване далеко від щілини (рис. 11.7, б), то через прилад проходить вузький пучок променів і щоб забезпечити заповнення коліматора у разі малого джерела, який до того ж неможливо приблизити достатньо близько до щілини, застосовується конденсорна система лінз або дзеркала, які створюють зображення джерела на щілині (рис. 11.7,в).

Недолік цього методу полягає в тому, що щілиною вирізається частина зображення джерела. Це призводить до того, що досліджується спектр тільки цієї частини випромінення, а не джерело в цілому. На рисунку 11.7 г наведено методику освітлення щілини через розсіючу пластину, яка пов'язана з великими втратами випромінення, але є найкращою з точки зору повного заповнення коліматора світлом.

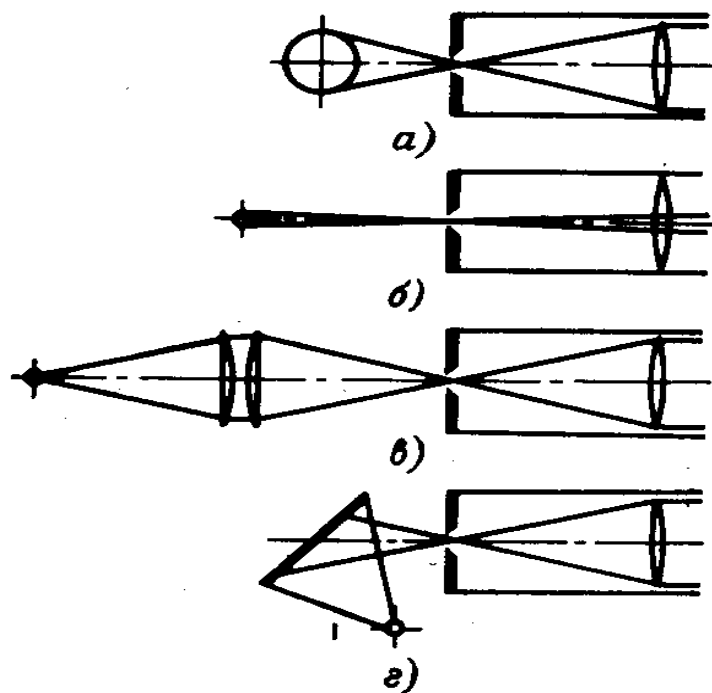


Рисунок 11.7 – Різні випадки освітлення щілини

### 11.3 Конструктивні елементи спектральних приладів

#### 11.3.1 Щілина спектрального приладу

У фокальній площині спектрального приладу розташовується дискретна або неперервна сукупність зображень щілини, що утворюють спектр.

Інструментальний контур більшості приладів з малою і середньою дисперсією визначається в основному якістю щілини. Тому щілина поряд з оптикою є найбільш відповідальним елементом конструкції приладу.

Щілина спектрального приладу створюється двома ножами, звичайно з нержавіючої сталі. Загальний вигляд щілини наведено на рисунку 11.8.

Обидва ножі рухаються симетрично відносно центра щілини і при встановленні на відмітку «0» автоматично стопоряться, так що подальше обертання мікрометричного гвинта не призводить до натиску ножів один на одного. Ножі щілини повинні лежати в одній площині перпендикулярно до головної оптичної осі приладу інакше умови проходження похилих пучків променів будуть різними.



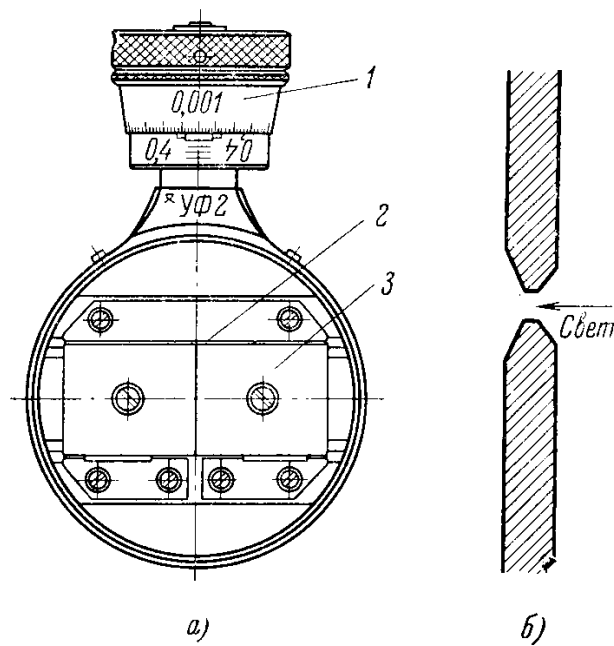


Рисунок 11.8 – Стандартна щілина УФ-2.

Загальний вигляд (а), та профіль ножів щілини (б):

1 – барабан мікрометричного гвинта, 2 – направляюча, 3 – ножі щілини

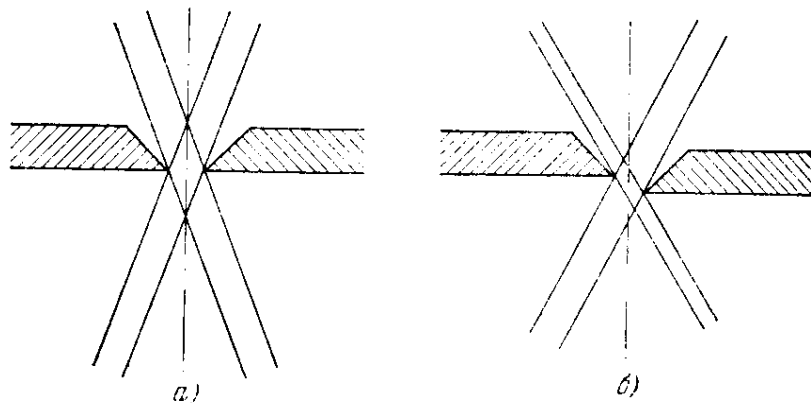


Рисунок 11.9 – Проходження світла крізь щілину, в якій ножі лежать в одній (а) і в різних (б) площинах

Ширина щілини має бути постійною по всій висоті. Ця постійність повинна витримуватися з похибкою менше ніж 1 %. Звідси і вимоги до якості щілини. Неминучим дефектом щілини може бути кінцева товщина, а також прилипаючі до ножів пилінки, що заважає використовувати щілини вже при розмірах 0,01 мм. Іноді застосовують ножі, які створюють щілину шириною  $a =$

5 ÷ 6 мкм, але точність такої щілини мала. Для спектрометричних робіт використовують більш широкі щілини  $a \approx 0,02 \div 0,1$  мм.

### 11.3.2 Диспергуючі системи. Види диспергуючих систем

Спектральна призма – це перший пристрій, який було застосовано для розкладання світла у спектр.

Спектральною призмою (далі – просто призма) називається багатогранник, виготовлений з прозорої речовини, який має значну дисперсію  $\frac{\partial n}{\partial \lambda}$ .

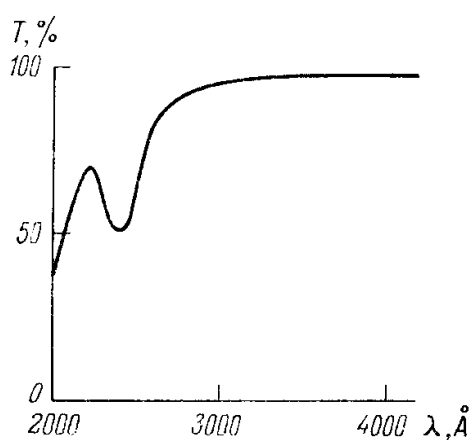


Рисунок 11.10 – Пропускання плавленого кварцу товщиною 1 см

При проходженні через призму пучок променів змінює свій напрямок, причому кут виходу променів залежить від довжини хвилі. Проходження променя крізь призму пов'язано з переломленням, яке залежить від матеріалу призми. Для виготовлення хороших призм використовують матеріал, прозорий в досліджуваній області спектра, такий що має велику дисперсію, досить високу оптичну однорідність та ізотропність. Задовільнити всім цим якостям важко, тому для різних областей спектра застосовують спектральні призми, виготовлені з різного матеріалу. Так, для УФ-області спектра часто використовують природний кристалічний кварц. Залежність спектрального коефіцієнта пропускання плавленого кварцу товщиною 1мм наведена на рисунку 11.10. Для видимої області спектра основним матеріалом для виготовлення призм служить скло, як правило, тяжкий флінт (далі ТФ). Для

інфрачервоної ( далі ІЧ ) області спектра призми виготовляють з кристалів хлористого натрію і хлористого кальцію. Криві дисперсії деяких оптичних матеріалів наведено на рисунку 11.11, де  $\lambda$  - довжина хвилі,  $n$  – показник переломлення середовища.

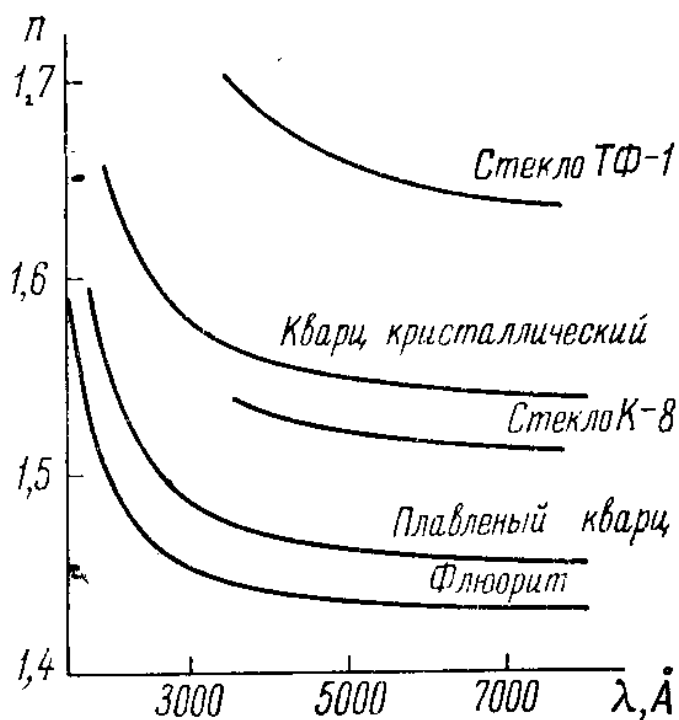


Рисунок 11.11 – Криві дисперсії деяких оптичних матеріалів

Спектральні призми великих розмірів і великої дисперсії можна виготовити з призматичних прозорих посудин, залитих відповідними рідинами. Для УФ-області найбільш підходить дистильована вода, прозора до вакуумного ультрафіолету, для видимої області спектра – сірковуглець.

Диспергуючим елементом в дифракційних спектральних приладах служить **дифракційна решітка**. Вона являє собою оптичну поверхню з металу або прозорого матеріалу, на яку тим чи іншим способом нанесено штрихи, що визначеним засобом розбивають фронт падаючої світлової хвилі на когерентні пучки і змінюють їх амплітуду або фазу.

У спектральних приладах в основному використовують дифракційні решітки, в яких штрихи нарізаються спеціальними машинами з алмазними різцями. Ці решітки мають рівновідстаючі один від одного паралельні штрихи, форма перерізу яких визначається профілем ріжучої грані алмазного різця.

Форма штриха може бути різною, але суттєвим є те, що елементи решітки – штрихи повторюються через строго однакові проміжки, котрі називаються періодом дифракційної решітки.

Існують відбиваючі й прозорі дифракційні решітки. На перших штрихи нанесені на дзеркальну (металеву), на других – прозору поверхню. У відбиваючих решіток результуюча інтерференційна картина створюється у відбитому від решітки випромінюванні, а в прозорих решіток – у світлі, що проходить.

У спектроскопії здобули розповсюдження відбиваючі дифракційні решітки, в яких дифрагуючі перепони (штрихи) розподілені еквідистантно на плоскій або вгнутій поверхні. Штрихи мають вигляд канавок, нарізаних на скляній, металевій пластині або металевому шарі, що покриває діелектричну поверхню. При відбитті від такої поверхні виникає розкладання випромінювання у спектр.

Дифракційні решітки нарізають алмазними різцями за допомогою розподільних машин, для видимої частини спектра, як правило, на шарі алюмінію товщиною  $0,2 \div 10$  мм, який напилено на скляну поверхню заготовки із підшаром хрому.

Для далекої УФ-області спектра дифракційні решітки виготовляють безпосередньо на поверхні скла, для ІЧ- області спектра – на шарі дюралюмінію, нержавіючої сталі, міді, бронзи.

Час нарізання одного штриха складає приблизно  $3 \div 8$  секунд залежно від глибини й ширини штриха. Чим глибше штрих, тим повільніше повинен бути рух різця.

При нарізанні решітки шириною 100 мм з  $1\ 200 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$  і довжиною штриха 800 мм різець повинен пройти без заточки 11 км. Нарізання такої решітки продовжується п'ять діб.

Для УФ – області спектра використовують решітки із  $3\ 600 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$ , при цьому відстань між штрихами становить 0,28 мкм.

У видимій області спектра використовують решітки із  $600 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$  та  $1200 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$ .

Для ІЧ - області спектра використовують решітки, які мають два штрихи на міліметр ( $2 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$ ). Такі решітки називають ешелетами.

## 11.4 Монохроматори

Конструкція монохроматорів відзначається великою різноманітністю. У наш час прилади із спектральними призми та лінзовою оптикою все більше витісняються приладами з дифракційними решітками і дзеркальними об'єктивами, що пов'язано з більшою світлосилою дифракційних приладів. Крім того основні властивості дифракційних спектральних приладів мають слабку залежність від довжини хвилі, що дозволяє використовувати один прилад у широкій області спектра.

Однак у видимій області спектра призмненні спектральні прилади широко використовуються на практиці й сьогодні.

### 11.4.1 Призмненні монохроматори з лінзовою оптикою

Найбільш розповсюдженим приладом такого класу є монохроматор УМ-2, призначений для видимої області спектра (рис.11.12).

Прилад має дві змінні призми Аббе. Призма обертається за допомогою гвинта, на барабані якого нанесені поділки у вільних одиницях, так що прилад потребує градування, яке полягає в точному визначенні відповідності довжини хвилі й оберту барабана у градусах.

Градування потрібно виконувати в якомога більшому числі точок. Для цих цілей використовують добре вивчені спектри, наприклад гелію, водню, ртуті, срібла, міді тощо.

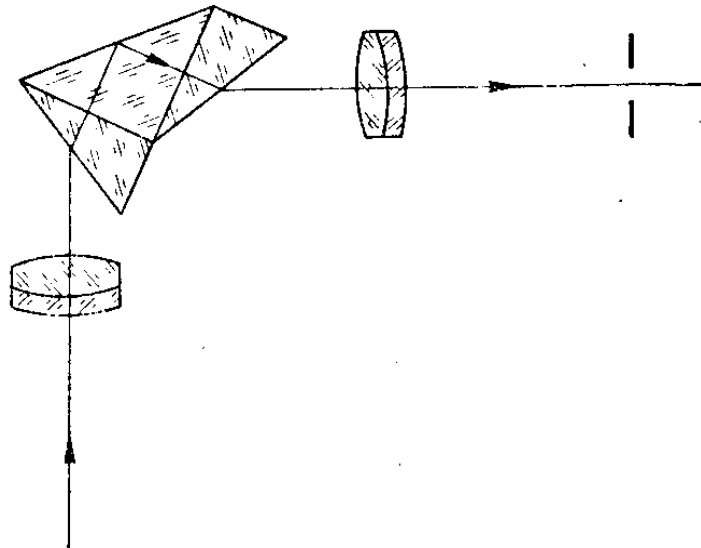


Рисунок 11.12 – Оптична схема монохроматора УМ-2

Від ртутної лампи використовують лінії ( $\lambda$ , нм):

579,1 – 577,0 – жовтий

546,1 – зелений

491,6 – блакитний

435,8 – синій

407,8 – 404,7 – фіолетовий.

Для градуювання вихідну щілину монохроматора замінюють окуляром і визначаючи зорovo відповідність визначеного кольору притаманній йому довжині хвилі ( $\lambda$ ) та оберту барабана  $n^0$ . На підставі залежності  $n^0 = f(\lambda)$ , будують градуювальний графік.

Градуювання може бути як візуальним шляхом спостереження ліній в площині вихідної щілини через окуляр, так і фотоелектричним, коли правильна установка лінії знаходиться за максимальним значенням фотоструму. Другий спосіб точніший і після візуального градирування, який полегшує орієнтацію, раціонально проводити фотоелектричне. В якості приймача випромінювання, як правило, застосовують фотоелектронний помножувач (ФЕП), тому що виділені монохроматором потоки випромінювання досить малі.

#### 11.4.2 Призменні монохроматори із дзеркальною оптикою

На рисунку 11.13 наведено одну з розповсюджених принципових схем призменних монохроматорів із дзеркальною оптикою ЗМР-3. Призма такого приладу змінна – кварцева або скляна з переломлюючим кутом  $56^\circ$  і гіпотенузою 64 мм. Фокусуючою оптикою служить параболічне алюмінієве дзеркало з фокусною відстанню 270 мм. Плоске дзеркало обертається гвинтом з барабаном, на якому нанесено шкалу. Прилад також потребує градуювання.

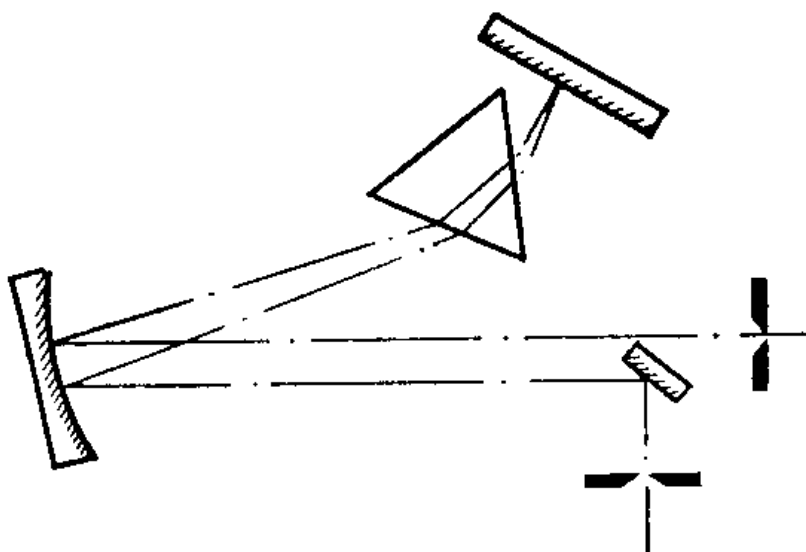


Рисунок 11.13 – Оптична схема монохроматора ЗМР-3

#### 11.4.3 Дифракційні монохроматори

Спектральні прилади з плоскими дифракційними решітками звичайно мають дзеркальні об'єктиви, тому можуть працювати в широкій області спектра, особливо при наявності змінних решіток з різним числом штрихів на 1 мм.

Дозволяючи здатність і світлосила таких приладів мають найвищу для щілинних приладів величину, що зумовлено, по-перше: досить великими геометричними розмірами плоских дифракційних решіток, по-друге, кутова дисперсія звичайно перевищує кутову дисперсію призм.

Конструктивне виконання приладів з плоскими дифракційними решітками досить різноманітне. Для приладів з великою лінійною дисперсією використовується схема Еберта (рис. 11.14). Об'єктивами в цій схемі служать

різні частини одного і того ж вгнутого дзеркала. Така схема застосовується для довгофокусних дифракційних спектрографів. Фокусна відстань такого приладу становить 4 м.

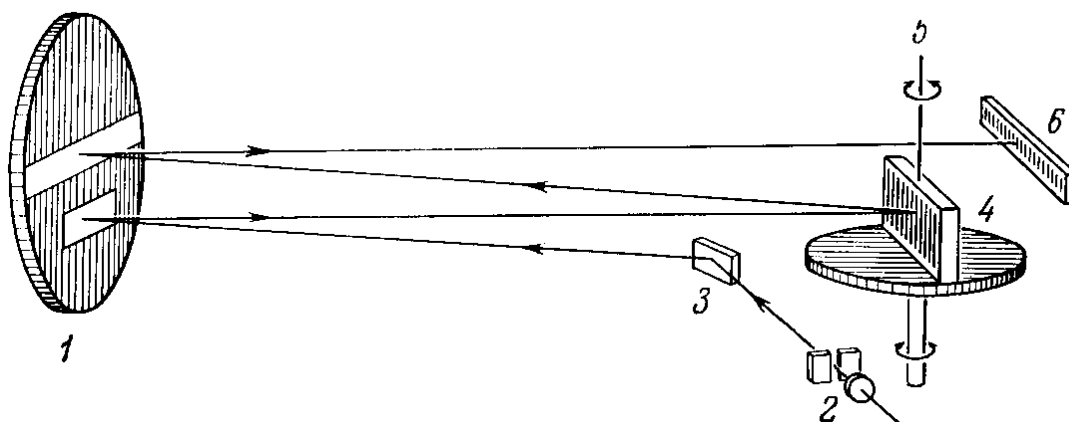


Рисунок 11.14 – Схема Еберта

У більш короткофокусних світлосильних приладах віддають перевагу схемі Черні-Турнера (рис. 11.15), яка має роздільні коліматорне і камерне дзеркало. За такою схемою зібрано прилад МДР-2.

Об'єктивами служать сферичні дзеркала з фокусом 400 мм.

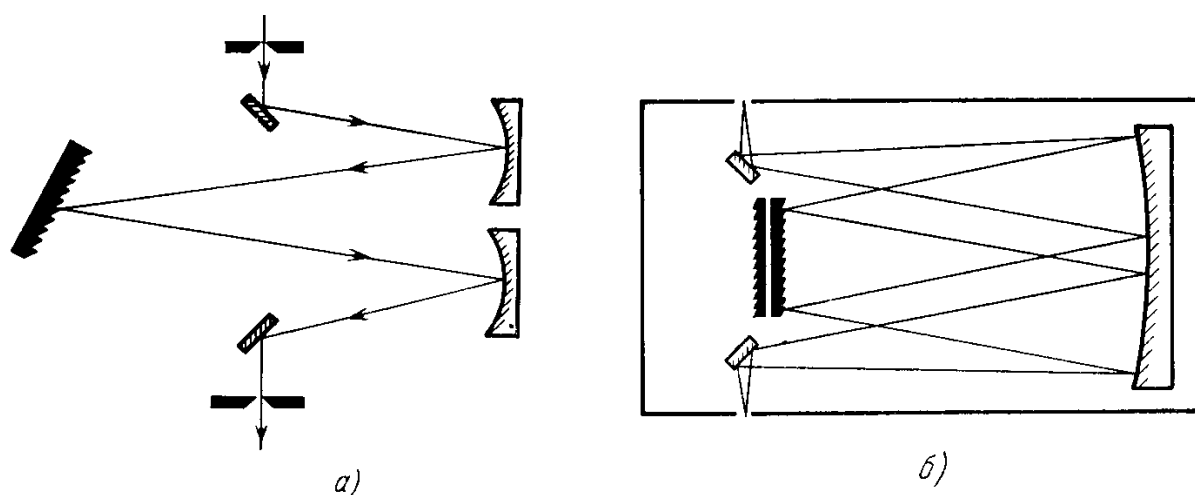


Рисунок 11.15 – Оптична схема монохроматорів МДР-2 (а)

і фірми Jarrel Ash (б)

Функції дифракційних решіток і об'єктивів можуть бути об'єднані в одному елементі – решітці, яка нарізана на вгнутому дзеркалі. Їх виготовлення не має особливих труднощів. Вгнута решітка має здатність фокусувати дифрагований спектр на околі з діаметром, рівним радіусу кривизни дзеркала



решітки, якщо сама решітка й вхідна щілина знаходяться на цьому околі. Це около має назву круга Роланда.

Установка ввігнутої решітки за схемою Пашена-Рунге показана на рисунку 11.16.

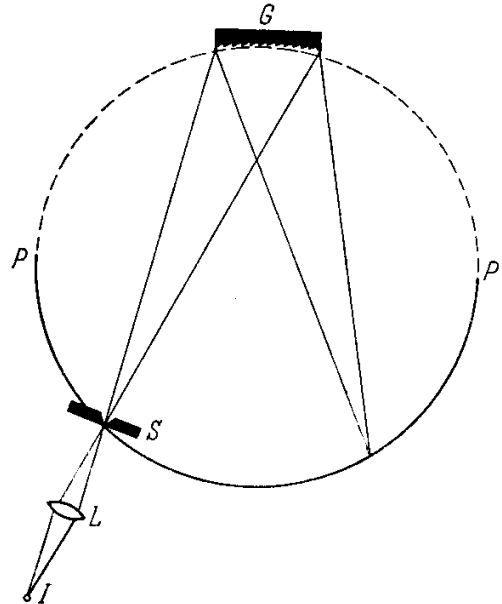


Рисунок 11.16 – Схема встановки вгнутої решітки по Пашену-Рунге:

$I$  – джерело світла;  $L$  – лінза,  $S$  – щілина;  $G$  – решітка,  $PP'$  – фокальна поверхня

## 11.5 Вимірювання спектрів випромінення

Установка для дослідження спектрів випромінення складається з монохроматора і приймача випромінення. Оскільки виділювані монохроматором потоки, як правило, малі, найбільш підходящим приймачем випромінення є фотопомножувач. Вибір типу ФЕП визначається областю спектра, для якого він застосовується. Розташування ФЕП за вихідною щілиною обирають таким чином, щоб фотокатод повністю перехоплював вихідне з монохроматора випромінення і щоб вихідний пучок займав більшу частину робочої площини катода, що робить установку менш чутливою до невеликих механічних зміщень фотокатода відносно пучка. Обране положення слід зберігати незмінним: відтворюваність положення забезпечується жорстким кріпленням помножувача на рейтері.

## ТЕМА12 КОЛЬОРОВІ ВИМІРЮВАННЯ

Способи вимірювання кольору прийнято умовно поділяти на три групи: спектральні ( з наступним розрахунком координат кольору), фотоелектричні й візуальні.

При спектральних кольорових вимірюваннях визначають спектральні характеристики випромінення джерел світла (абсолютні або відносні) або спектральні характеристики відбивання (пропускання) для несамосвітних предметів. За отриманими спектрофотометричними (або спектро радіометричними) даними координати кольору та кольоровості визначаються розрахунком. Колір в такому разі вважається отриманим при складанні множини спектральних кольорів, що відповідають монохроматичним випроміненням, інтенсивності яких оцінювалися у процесі спектрального вимірювання. Відносний вклад цих спектральних кольорів у сумарний (вимірювальний) колір визначається трьома функціями – кривими складання кольорів. Цей спосіб визначення кольору вважається побічним.

Прилади, що служать для безпосереднього вимірювання кольору, називаються **колориметрами**. Колориметри залежно від застосованого в них приймача бувають візуальними й фотоелектричними. У візуальних колориметрах колір досліджуваного випромінення зіставляється на підставі зорового сприйняття з кольором, який виробляється трьома основними кольорами колориметра. Залежно від способу відтворення візуальні колориметри поділяються на дві групи: адитивні й субтрактивні.

У візуальних колориметрах спостерігач повинен встановити за зоровим відчуттям колориметричну рівність двох частин поля зору (поле досліджуваного випромінення і поле порівняння), які мають знаходитись в оптичному контакті, що створюється за допомогою фотометричного кубика. Для забезпечення участі ковбчкового кольоросприймаючого апарату розмір

поля зору колориметра має бути  $1,5^{\circ}-2^{\circ}$ , а його яскравість не менше ніж  $(5-10) \frac{\text{кД}}{\text{м}^2}$ .

**В адитивних колориметрах** поле порівняння освітлюється оптичною сумішшю трьох кольорових випромінень, які отримують фільтрацією випромінення лампи порівняння трьома розділяючими фільтрами: червоним, зеленим і синім.

Найпростішим адитивним колориметром є диск Максвелла, який використовувався ним для дослідження законів оптичного змішування кольорів. Диск Максвелла складається з трьох різнокольорових (червоного, зеленого й синього), а також двох додаткових (білого й чорного) секторів і приводиться в обертання, що забезпечує злиттєве сприйняття кольору секторів, які обертаються. Білий і чорний сектори застосовують для зменшення чистоти, а значить і яскравості суміші трьох основних кольорів при встановленні кольорового рівняння з вимірювальним кольором. У центральній частині диску (рис. 12.1) розташовано менший диск, колір відбитого випромінення від якого треба дослідити. Колір досліджуваного випромінення визначається кутовим розміром секторів, що розташовані в полі порівняння. Якщо кольори секторів виражені через основні кольори системи XYZ, диск можна застосовувати для приблизного визначення координат кольору відбитого випромінення в міжнародній кольоровій системі. Для зменшення яскравості досліджуваного кольору, фарбник якого має високий коефіцієнт відбиття, в центральній частині диска доводиться використовувати чорний сектор.

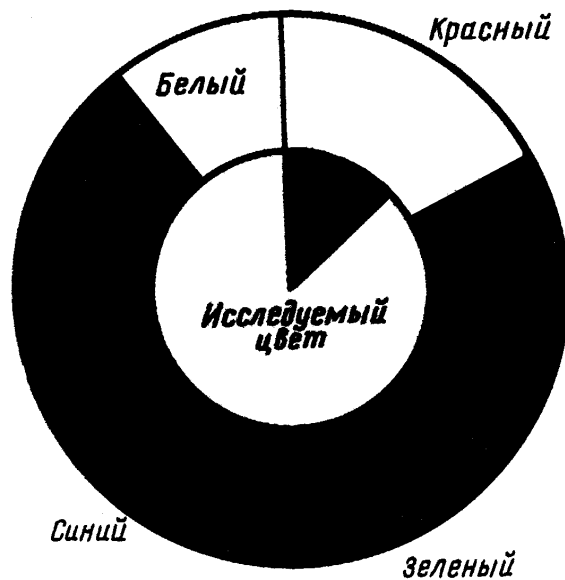


Рисунок 12.1 – Диск Максвелла

Широке застосування у практичній колориметрії знайшов візуальний колориметр Л. І. Дьомкіної, в якому лампа розжарення, що розміщувалась в дифузно відбиваючому світлоциліндрі, служить джерелом порівняння ІС.

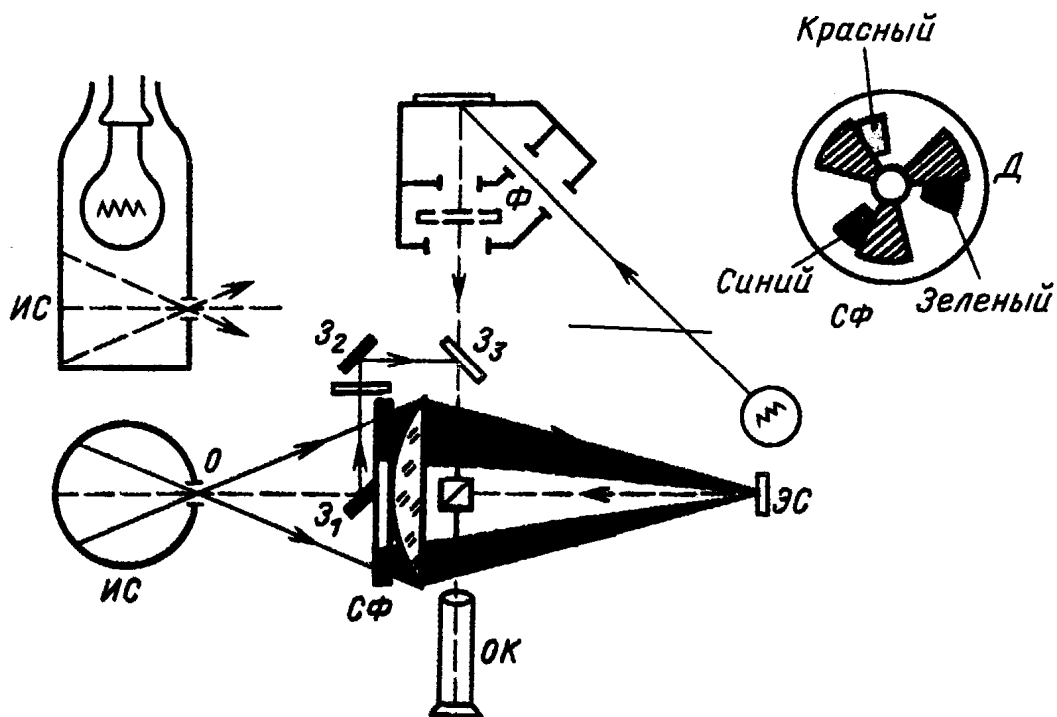


Рисунок 12.2 – Схема візуального колориметра Дьомкіної

Отвір О цього циліндра, через який світловий потік виходить зовні, проєцюється лінзою Л на екран порівняння ЭС. Перед лінзою Л на шляху пучка променів, що виходить з освітлювача, розташовані три секторні фільтри СФ

(червоний, зелений та синій). Кожен з цих трьох фільтрів може частково або повністю перекриватися секторною діафрагмою  $D$ , яка переміщується спостерігачем окремо для кожного фільтра. Співвідношення площ розкриття трьох фільтрів, яке регулюється положенням трьох діафрагм, визначає кольоровість суміші випромінювань, що падають на екран порівняння. Колір випромінювання, відбитого від білого матового екрану, співвідноситься спостерігачем з кольором досліджуваного випромінення через окуляр ОК за допомогою фотометричного кубика ФК. У тих випадках, коли колір досліджуваного випромінення неможливо відтворити трьома основними кольорами колориметра, використовують спосіб розбавлення досліджуваного кольору пучком променів, які відводяться від пучка світла джерела порівняння дзеркалами  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ . Останнє з дзеркал, розташоване на шляху пучка досліджуваного випромінення, є прозорою плоско паралельною скляною пластиною, що відбиває приблизно 10 % потоку, який йде від дзеркала  $Z_2$ . На шляху пучка променів, що розбавляє, можна вводити світлофільтр  $\Phi$ , нейтральний або кольоровий залежно від умов вимірювання.

**В субтрактивних колориметрах** відтворення досліджуваного кольору на полі порівняння здійснюється фільтрацією випромінення джерела порівняння за допомогою трьох кольорових клинів, послідовно розташованих на шляху пучка променів порівняння. Характерним прикладом колориметра цього типу є кольоровий денситометр, оптична схема якого показана на рисунку 12.3. Вимірювальний зразок (1) розміщується у правому пучку колориметра і урівнюється трьома клинами (2), які розташовані в лівому пучку променів приладу. Кожному кольору відповідає одне визначене положення трьох клинів. Градування колориметра проводиться за допомогою сірих фільтрів, які розміщуються в лівому пучку, або за допомогою діафрагми (3).

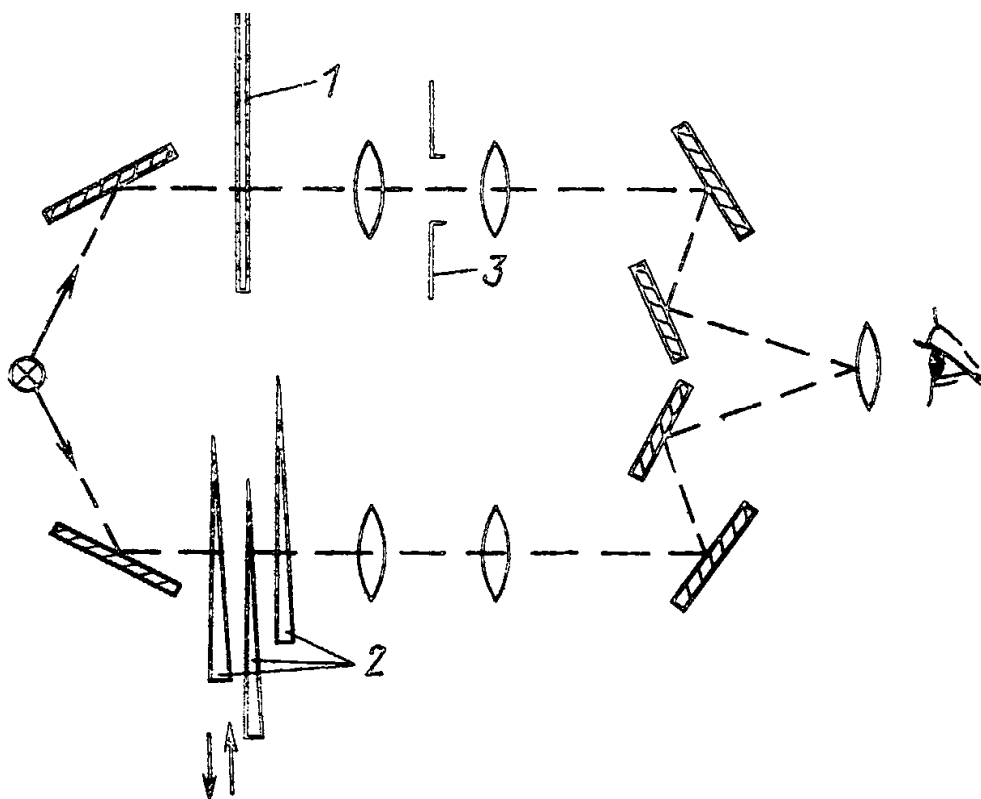


Рисунок 12.3 – Схема субтрактивного колориметра (денситометра)

У фотоелектричних колориметрах приймачами випромінення служать фотоелементи або фотопомножувачі, спектральна чутливість яких зкоригована за допомогою виправляючих фільтрів під криві складання тієї колориметричної системи, в якій проводяться вимірювання. Звичайно такою системою є міжнародна система XYZ. У цій системі з досить високою точністю спектральна чутливість селенових фотоелементів коригується під криві  $\bar{y}(\lambda)$  та  $\bar{z}(\lambda)$ , які мають по одному максимуму. Підбір селенового фотоелемента до функції  $\bar{x}(\lambda)$  ускладнюється існуванням в ній двох максимумів. Вирішити це завдання можна, застосувавши два фотоелементи, один з яких повинен мати кориговану криву  $\bar{x}(\lambda)$  в області  $\lambda \geq 505$  нм, а другий – в області  $\lambda \leq 505$  нм.

Для усунення похибки, що виникає від нестабільності чутливості у чотирьох різних фотоелементів колориметра, їх часто замінюють одним із змінними виправляючими фільтрами. У такому разі вимірювання кольору проводиться окремо за компонентами.

Координати кольору випромінення з відомим розподілом енергії випромінення за спектром  $\varphi(\lambda)$  розраховують за формулами

$$x' = \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda ; \quad (12.1)$$

$$y' = \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda ; \quad (12.2)$$

$$z' = \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda . \quad (12.3)$$

Якщо освітлювати фотоелемент таким джерелом, отримаємо величину струму, що задовольняє рівняння:

$$i = C \int \varphi(\lambda) S_{\text{відн.}}(\lambda) d\lambda , \quad (12.4)$$

де  $C$  – коефіцієнт пропорційності;  $S_{\text{відн.}}(\lambda)$  – функція відносної спектральної чутливості фотоелемента.

Підбір коригуючих світлофільтрів дозволяє вимірювати координати кольору випромінення.

Схема влаштування триканального колориметра одночасної дії із спектральним узгодженням за допомогою світлофільтрів наведена на рисунку 12.4,а. Три канали колориметра призначені для вимірювання трьох координат кольору, наприклад XYZ. Світло від вимірювального кольорового зразка, яке виділяється за допомогою діафрагми Д і об'єктива О, поділяється дзеркалами З на три канали. У кожному каналі є світлофільтр С, приймач випромінювання П й індикатор И. Світлофільтри служать для спектрального узгодження трьох каналів колориметра, а потенціометри на виході приймачів випромінення – для регулювання чутливості при градуюванні колориметра.

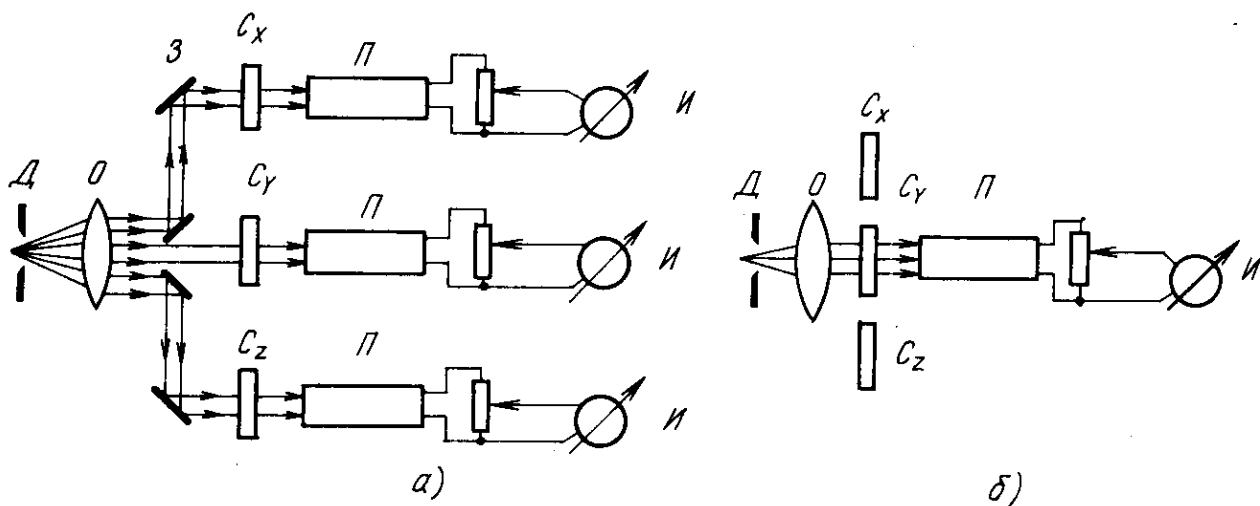


Рисунок 12.4 – Принцип дії фотоелектричного колориметра  
одночасної (а) і почергової (б) дії

Колориметр почергової дії має один приймач випромінення, один індикатор і три змінні світлофільтри, які почергово розміщуються перед приймачем випромінення (рис.12.4 б). Значення трьох координат кольору показуються індикатором почергово при встановленні на шляху потоку випромінення відповідних світлофільтрів.

Колориметри почергової дії простіші за конструкцією. Колориметри одночасної дії дозволяють скоротити час вимірювання і застосовуються при вимірюванні кольорів нестабільних джерел, наприклад екранів кінескопів, де яскравість світіння за час почергового відліку трьох координат кольору може змінитися.

У колориметрах одночасної дії перед кожним вимірюванням необхідно робити градування, щоб компенсувати можливі зміни інтегральної чутливості трьох приймачів випромінення. У колориметрах почергової дії це не обов'язково тому, що зміна інтегральної чутливості приймача випромінення може вплинути лише на точність вимірювання абсолютних значень координат кольору (яскравості). Вона не вплине на результати вимірювання координат кольоровості, що є метою більшості вимірювань з колориметрами.

У фотоелектричному колориметрі Шкловера (рис. 12.5) приймачем випромінення служить селеновий фотоелемент ФЕ. На фотометричній лаві



розташований освітлювач  $O$  з лампою розжарення  $L$ . По лаві вільно рухається кожух  $K$  з отвором, перед яким розміщується тубус, який запобігає надходженню відбитих променів на фотоелемент. У кожусі розміщуються приймач і два диски з отворами  $D_1$  і  $D_2$ . Обертання дисків виконується ручкою  $P$ . Кожен з дисків має по п'ять фіксованих положень (рис. 12.6).

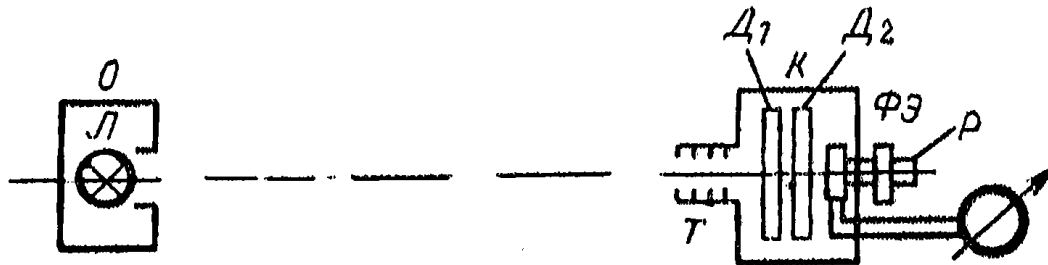


Рисунок 12.5 – Схема фотоелектричного колориметра Шкловера

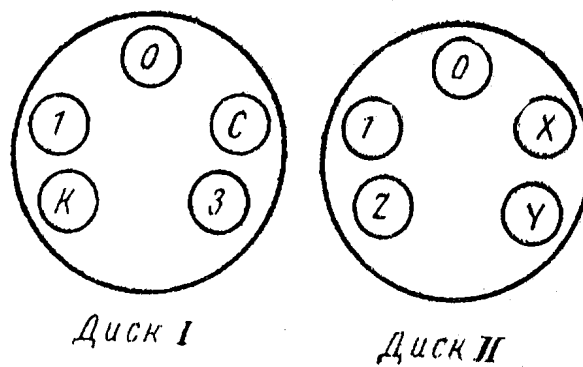


Рисунок 12.6

При трьох фіксованих положеннях першого диску перед ФЕ розміщуються відповідно світлофільтри К,З,С, при четвертому – отвір в диску, при п'ятому – непрозоре вікно. Кожне фіксоване положення першого диску відзначається появою в спеціальному віконці одного з індексів : К,З,С,0,1. Цей диск служить для періодичного градуювання колориметра і вимірювання кольорової температури.

Другий диск також має п'ять фіксованих положень. Кожне з фіксованих положень диску  $D_2$  відзначається появою поруч з індексом першого диску одного з індексів Х,У,З,0,1, що забезпечує розміщення перед ФЕ одного з фільтрів (Х,У,З) і дозволяє проводити вимірювання координат кольору. Положенням дисків 1-1 перевіряють нульовий відлік гальванометра.

Якщо треба визначити малі різниці в кольорі, то колориметри для такої цілі не підходять і на виробництві, коли колір має велике значення при випуску товарів народного споживання, застосовують особливі пристрої, які називаються **компараторами кольору**. Як виходить з назви, основне призначення компараторів кольору полягає у забезпеченні можливості спостереження двох близько розташованих полів зору, одне з яких освітлено світлом стандартного випромінення, а друге – світлом досліджуваного випромінення. На практиці в ряді випадків не потрібне точне вимірювання значень координат кольору, а треба лише визначити відміну кольору вимірювальних зразків від кольору деякого зразка порівняння як при кольоровому контролі в тих галузях промисловості, де важлива висока ступінь однокольоровості продукції.

На рисунку 12.7 наведена оптична схема фотоелектричного компаратора кольору ФКЦШ-М.

Джерело світла (1) – лампа розжарення, спектр якої за допомогою скляних світлофільтрів відкориговано під стандартне джерело С. Електричний режим лампи підібрано таким чином, що без світлофільтра лампа працює в режимі джерела А. Приймачами випромінення є фотоелементи Ф – (9) , (7) , (12) , спектральна чутливість яких виправлена під криві складання. Коригування здійснюється за допомогою скляних фільтрів (2), які вводяться в пучок світла лампи. Переміщення касети із світлофільтрами дозволяє послідовно виміряти відношення усіх координат.

В основу приладу покладена двопроменева оптична схема. Світловий потік від лампи (1) розділяється за допомогою призми (18) і далі за допомогою дзеркал (3) і (16) направляється у фотометричні кулі (8) і (11). Лінза (19) розташована таким чином, що джерело світла знаходиться у фокусі її, що дає змогу направити у фотометричну кулю (8) паралельний пучок променів, який проходить вимірювальну діафрагму (5) ( у другій гілці - діафрагму (14)). Лінза (6) створює проєкцію нитки розжарення джерела світла в площині відбиваючого зразка (9). У другій гілці лінза (13) створює проєкцію вихідного

отвору конденсора (17) на відбиваючий зразок (10) у вигляді рівномірно освітленої плями. Для вимірювання кольору рідин передбачені кювети (4) і (15). Відбите від зразків (9) і (10) світло після багаторазових відбивань надходить на фотоеlementи (7) і (12). Порівняння потоків проводиться за рахунок виміру площі вимірювальної діафрагми (5), яка пропорційна поділкам барабану.

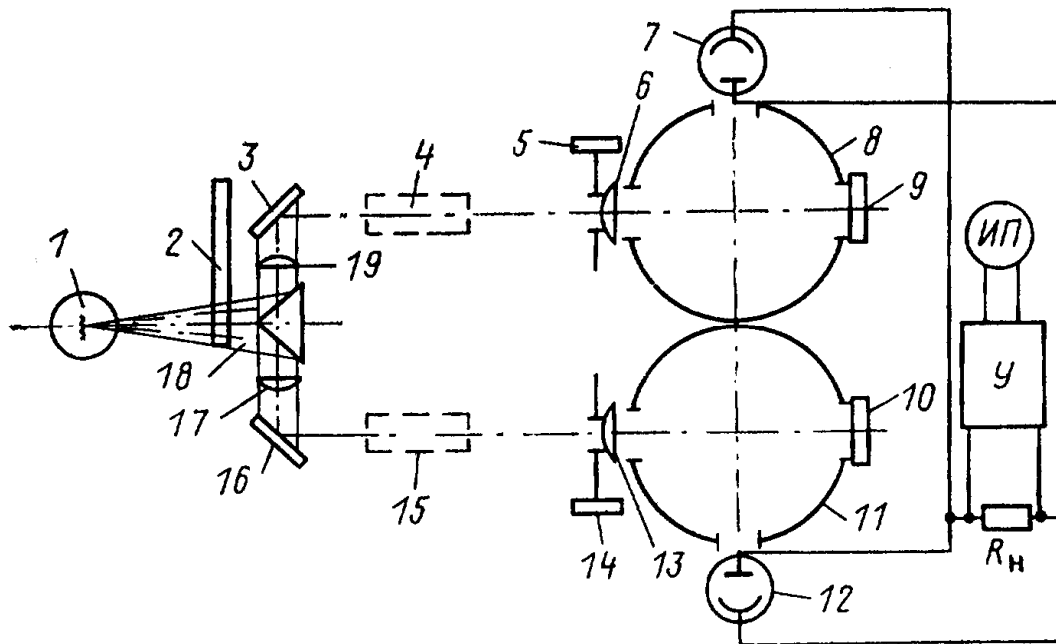


Рисунок 12. 7 – Оптична схема фотоелектричного компаратора кольору

Фотоеlementи (7) і (12) з'єднані за диференціальною схемою. Їх струми, які течуть через навантажувальний опір  $R_n$  мають протилежні напрямки. Посилувач  $У$  збільшує різницю потенціалів на навантажувальному опорі. Індикатор приладу ИП дозволяє судити про рівновагу в схемі. При рівності потоків, що падають на фотоеlement, фотоструми компенсують один одного і індикаторний прилад показує нуль. При нерівності – стрілка приладу відхиляється від нульового значення. Вимірювання кольорової різниці при цьому зводиться до вимірювання розкриття діафрагми до встановлення рівноваги в схемі. По відношенню відліків, пропорційних площам розкриття діафрагм, визначається відношення координат кольору зразків.

Результат вимірювання кольорової різниці між вимірювальними зразками буде представлений трьома відліками:  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , що являє собою відношення координат кольору цих зразків в системі компаратора кольору M,Y,Z.

## ТЕМА 13 ФОТОМЕТРІЯ СВІТЛОДІОДІВ

### 13.1 Методи вимірювання світіння світлодіодів

До основних характеристик світлодіодів відносяться: фотометричні (світлові) характеристики, радіометричні (енергетичні), колориметричні (спектральні) та експлуатаційні характеристики.

Фактичне вимірювання значення світлових характеристик світлодіодів, наприклад світлового потоку, може відрізнятись від розрахункової величини із-за варіацій просторового розподілу випромінення світлодіода. Це особливо помітно при перерахунку несиметричних діаграм спрямованості випромінення (наприклад, світлодіодів з овальною оптикою) і індикатрис вузьконаправлених світлодіодів. Тільки безпосереднім виміром цієї величини можна з високою точністю отримати її значення в люменах.

Фотометричний вимір світлодіодів може виявитися «мистецтвом», ніж просто розрахунком із застосуванням строгих фізичних формул. Існує маса чинників (геометричні і електричні нюанси, різні похибки, внесені на етапі виробництва світлодіодів), варіації яких можуть істотно впливати на оптичні властивості світлодіодів.

Існує безліч чинників, таких як колір, геометрія приладу, точність вирівнювання світлодіода в кріпленні вимірювальної установки, температура і так далі, які можуть привести до помилки у вимірах. Точність вимірів  $\pm 5$  натеперішній час вважають стандартним і широко застосовним в промисловості, але при дотриманні обережності і належної уваги цілком реально отримати  $\pm 2,5\%$ .

Так, при фотометруванні оптичний центр світлодіода нерідко відхиляється на 5 або більше градусів від механічного. Можливо, це не є особливою проблемою, коли вимірювані світлові прилади мають широкий кут світіння, наприклад 40 градусів або більше. Але для світлодіодів з вузьким кутом світіння результат може відрізнятись на значну величину. Треба відмітити, що

Міжнародна комісія з освітлення (CIE) рекомендує використовувати саме механічну (а не оптичну) вісь світлодіода при проведенні вимірів.

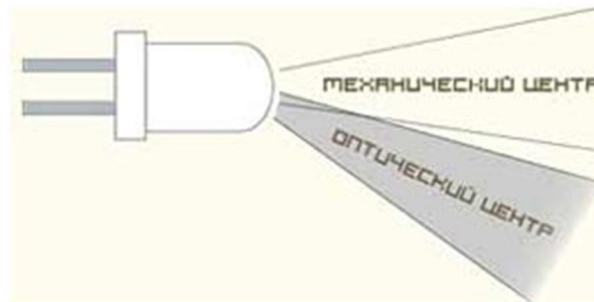


Рисунок 13.1 — Девіація кута світіння

Основний метод виміру повної оптичної потужності випромінення світлодіодів ґрунтується на використанні сферичного інтегруючого фотометра. Такий метод дозволяє не враховувати залежність від кута світіння і не призводить до кутових похибок, характерних для інших методів фотометрування.



Рисунок 13.2 – Інтегруючий фотометр

Найбільш широке застосування отримали сфери діаметром від 75 до 150 мм. Якщо критична точність вимірів, то переважний більший діаметр, оскільки важливим є співвідношення площі сфери до розміру світлодіода. Проте при вимірах світлодіодів з різним просторовим розподілом сили світла помилки неминучі.

Головним чинником, що вносить помилку у виміри, є місце розташування світлодіода в сфері. Остання специфікація, прийнята CIE, припускає, що корпус

світлодіода повинен повністю знаходитися в сфері - це так званий « $2\pi$ » вимір світлового потоку.

### 13.2 Колориметричні параметри світлодіодів

Колориметричні параметри світлодіодів зазвичай виражені в координатах колірності або в довжинах хвиль. Колірне сприйняття людини дуже складне, оскільки воно залежить не лише від різних фізичних властивостей світла, але також і від навколишніх об'єктів, механічних властивостей випромінювача, фізіологічного відгуку ока спостерігача і його психологічного стану.

Зазвичай координати колірності визначаються тільки осями X і Y. Але якщо світлодіод не має «білого» світіння, більшість специфікацій, що надаються виготівниками, містять не координати колірності, а швидше пікову і домінуючу довжини хвиль. Домінуюча довжина хвилі використовується для позначення кольору в координатах CIE. Це, по суті, колір, що фактично сприймається людським оком. Пікова довжина хвилі - це довжина хвилі максимальної спектральної інтенсивності. Пікове значення легко визначити, і тому воно є найбільш частим параметром, що вказується виготівниками світлодіодів. Проте пікова довжина хвилі має менше практичне значення для застосувань в області спектру, що сприймається людським зором: два світлодіоди можуть мати однакову пікову довжину хвилі, але будуть оцінені людиною як різні кольори.

Ще один метод виміру кольору - це використання спектрофотометра.

Цей пристрій реєструє і вимірює спектральний розподіл потужності джерела світла, після чого можуть бути математично вичислені усі фотометричні, радіометричні і колориметричні параметри. Точність визначення устаткуванням довжини хвилі має бути не нища ніж 0,5 нм (бажано 0,1 нм).

Існують різні чинники, що впливають на отриманий результат. Одним з них є температура. З підвищенням температури довкілля збільшується і температура активної області світлодіода, відповідно збільшується довжина хвилі випромінювання світлодіода. Це збільшення зазвичай має значення в межах

0,1 - 0,2 нм / °С залежно від типу використовуваного кристала. Деякі світлодіоди, наприклад, червоного світіння, можуть демонструвати і негативну температурну залежність довжини хвилі.

### 13.3 Гоніометричні (кутові) характеристики світлодіодів

Суть цього методу ґрунтована на покроковій фіксації значень сили світла світлодіода при його повороті на відомий кут, що може бути реалізовано переміщенням приймача оптичного випромінення навколо світлодіода або нахилами світлодіода відносно нерухомого приймача ( тема 6.1).

Декілька вимірів значення сили світла робляться для кожного кута, при виконанні обертання від 0 ° до 180 °. В результаті отримуємо профіль випромінення в одній площині – розподіл кривої сили світла в просторі або об’ємне – фотометричне тіло світіння світлодіода.

Оскільки більшість світлодіодів мають округлу форму лінзи, то найчастіше діаграма спрямованості випромінення (індикатриса) є симетричною.

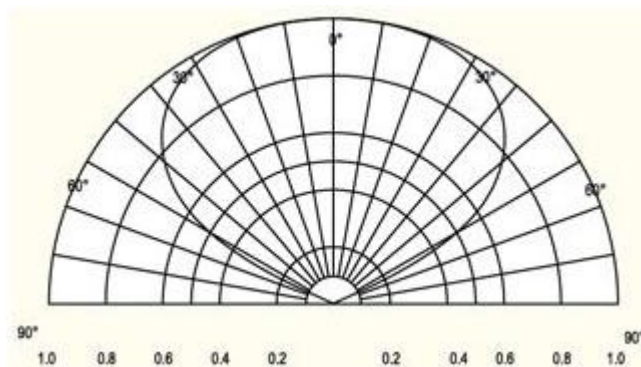


Рисунок 13.3 – Діаграма розподілу сили світла

Багато виробників світлодіодів надають саме таку діаграму в якості графічного представлення кута світіння світлодіода. Але, як вже вказувалося вище, відхилення в геометрії і похибці, внесені в ході виробництва світлодіодів, можуть істотно змінити їх оптичні властивості. Тому необхідно виконати додаткові сканування і зробити виміри в різних площинах. Крім того, деякі світлодіоди специфічних форм (овальних або еліптичних) мають дві діаграми спрямованості (30° × 70°).



Для побудови розподілу кривої сили світла в просторі найбільш підходить гоніофотометр, робота якого основана на методі зональних тілесних кутів. Якщо гоніофотометр недоступний, то отримати грубу діаграму спрямованості можливо з використанням люксметра або приймача оптичного випромінення, вручну обертаючи приймач або люксметр, і реєструючи рівень виходу випромінення з фіксацією точки даних. Проте такий метод може бути дуже стомливим, віднімаючи багато часу та вносити додаткову похибку при вимірюванні.

#### **13. 4 Експлуатаційні характеристики світлодіодів або тест на деградацію**

Немаловажлива тема для подальшого обговорення - термін їх служби. Експлуатація - це серйозно, адже лампи перегорають. Крім того, світловий потік лампи зменшується в процесі роботи. Термін служби - найважливіший експлуатаційний параметр джерел світла. Розрізняють повний (поки світловий прилад не перегорить) і корисний (поки світловий потік не впаде нижче певної межі) термін служби.

Проектуючи світлове рішення, не можна забувати про подальшу експлуатацію освітлювальної установки, зокрема, про заміну ламп. Часта заміна ламп у важкодоступних місцях може перетворити експлуатацію на жах. Ще більш гірший варіант - тривала робота освітлювальної установки з лампами, що перегоріли, руйнують світловий образ, що дуже актуально для установок зовнішнього архітектурного освітлення.

## ТЕМА 14 МЕТОДИ ІМПУЛЬСНОЇ ФОТОМЕТРІЇ

Імпульсні джерела світла - імпульсні лампи й оптичні квантові генератори використовуються не тільки для наукових цілей, але й у промисловості, привертаючи до себе все більшу увагу. Вони знайшли застосування у фотографії, сигналізації, на заводах для ремонту рухомих частин механізмів. Оптичні квантові генератори перетворились в найважливіші прилади у зварювальному процесі, в безконтактному вибиванні отворів в металі, при виготовленні інтегральних мікросхем, в медичній техніці в офтальмології і онкології, метеорологічній службі та в багатьох інших галузях.

Поняттям імпульсної фотометрії визначається відділ оптики, який займається вимірюванням інтенсивності випромінення, тобто сукупністю теоретичних і експериментальних питань, пов'язаних з кількісним порівнянням видимих і невидимих випромінень незалежно від їх положення у спектрі і від вибору приладу, за допомогою якого вони досліджуються.

Реальна межа випромінення джерел і межі чутливості приймачів оптичного випромінення досить жорстко обмежують область спектра, яку може охопити фотоелектрична імпульсна фотометрія.

**Імпульсна фотометрія** складає частину загальної дисципліни – фотометрії, хоча і має відмінні особливості по відношенню до класичної фотометрії, що ставлять її в особливе положення. Тому при вимірюванні в досить широкій області спектра інтенсивності імпульсних випромінень не можна забувати про основи візуальної фотометрії і про принципи побудови системи світлових величин.

Імпульсна фотометрія вивчає не тільки просторові, але й часові характеристики джерел і приймачів у широких динамічних діапазонах потоків і енергій випромінення, коли починають проявлятися особливості, які не властиві їм при роботі в умовах режиму постійного випромінення. Параметри окремих фотометричних елементів виявляються на межі нелінійних явищ.

Короткочасність імпульсних випромінень, особливо однократних, ставить перешкоду для використання візуальних методів фотометрування. Доводиться застосовувати інші засоби вимірювання, серед яких визначне місце належить фотоелектричній імпульсній фотометрії, яка об'єднує і високу чутливість, і часовий дозвіл завдяки застосуванню методів і елементів сучасної електроніки.

Імпульсні фотоелектричні фотометричні пристрої за призначенням можна розділити на дві групи:

- пристрої для вимірювання світлових (візуальних) і енергетичних фотометричних величин, що характеризують імпульсне випромінення, і
- пристрої, які використовують імпульсне випромінення для вимірювання величин, що характеризують фотометричні властивості тіл.

Блок-схема фотометричного пристрою складається з вимірюваного джерела випромінення або джерела, яке використовується у приладі для вимірювання фотометричних характеристик зразків, оптичної системи, приймача випромінення і реєструючої системи.

Для оцінки енергетичних і світлових параметрів імпульсного випромінення застосовують ті самі величини, що й в класичній фотометрії (табл. 14.1).

Частина цих величин відноситься до миттєвих величин (що звичайно не підкреслюється, коли мають справу з незмінним у часі випроміненням), тоді як інші мають частку  $t$  і відносяться до розряду інтегральних у часі величин. Значення множника  $t$  не обмежено чисельними межами і інтегральні фотометричні величини в рівній мірі застосовуються як для імпульсів довжиною в десяті й соті частки секунди, що може представляти інтерес і для класичної фотометрії (і фотографії), так і для імпульсів мікро-, нано- та пікосекундного діапазонів, яким може оперувати сучасна імпульсна фотоелектрична фотометрія.

Таким чином імпульсна фотометрія отримала від класичної фотометрії майже повний комплект необхідних величин.

Методи вимірювання світлових параметрів імпульсних джерел світла засновані на застосуванні фотометричних приймачів випромінення, спектральна чутливість яких коригується під відносну спектральну чутливість ока людини.

При вимірюванні характеристик випромінення імпульсних джерел світла необхідно зважати на те, що форма і тривалість імпульсів її випромінення різні для різних частин світлового тіла і залежать від напрямку спостереження і довжини хвилі. Тому для різних за конструкцією імпульсних ламп слід чекати різних результатів при вимірюванні таких характеристик, як тривалість і форма імпульсу навіть для ламп однакової потужності.

Таблиця 14.1

Величини		Одиниці вимірювання миттєвих величин	
Миттєві	Інтегральні в часі	енергетичних	світлових
Світловий потік (потік випромінення), $\Phi$	Світлова енергія (енергія випромінення) $Q = \int \Phi(t)dt$	Вт	лм
Сила світла $I = \frac{d\Phi}{d\varpi}$	Освічування $\Theta = \int I(t)dt$	Вт / ср	кд
Яскравість $L = \frac{d^2\Phi}{dA_{np}d\varpi}$	$\int L(t)dt$	Вт / ср·м <sup>2</sup>	кд / м <sup>2</sup>
Світимість $M = \frac{d\Phi}{dA}$	$\int M(t)dt$	Вт / м <sup>2</sup>	лм / м <sup>2</sup>
Освітленість $E = \frac{d\Phi}{dA}$	Експозиція $H = \int E(t)dt$	Вт / м <sup>2</sup>	лк

Завдання, які вирішуються в імпульсній фотометрії, зводяться до знаходження важливих світлотехнічних та енергетичних характеристик для даного типу імпульсних джерел світла методами, які дають найбільшу точність і надійність результатів вимірювання. Так, сила світла  $I(t)$  у різні моменти часу

імпульсного розряду і освічування  $\Theta$  може визначатися шляхом вимірювання освітленості  $E(t)$  і експозиції  $H$  за час імпульсу або шляхом прямого вимірювання за допомогою оптичної телецентричної системи.

Визначення світлового потоку  $\Phi(t)$  і світлової енергії  $Q$  може проводитись як експериментально за допомогою інтегруючого фотометра, так і розрахунковим шляхом за даними просторового розподілу сили світла і освічування, які можуть бути отримані за допомогою розподільчого фотометра або гоніофотометра.

У процесі проходження імпульсного світлового розряду в просторі приймач оптичного випромінення, що знаходиться у вимірювальній схемі, видає сигнал, який буде реєструватися відповідними електровимірювальними приладами і пристроями. Пікові (максимальні) значення, що проходять через приймач випромінення, вимірюються осцилографами, імпульсними піковими вольтметрами. За допомогою цих приладів можна дослідити часові залежності параметрів випромінення. Для вимірювання інтегральних характеристик слід застосовувати електронні пристрої з вхідними накопичувальними конденсаторами або балістичними гальванометрами.

Слід пам'ятати, що в процесі вимірювання треба старанно екранувати приймач випромінення і всі електровимірювальні ланцюги фотометричних пристроїв від електромагнітних полів, які спричиняються розрядами, що проходять через імпульсне джерело випромінення. Нульовий сигнал при повністю зачиненому вхідному вікні фотометра буде свідчити про відсутність впливу перешкод.

Енергетична фотометрія імпульсних джерел випромінення знаходиться у стадії становлення і ще не забезпечена достатньо точними й перевіреними засобами. Тому для вимірювання енергетичних параметрів імпульсних ламп поки що застосовують широко відомі теплові (нейтральні) приймачі випромінення – термостовпчики і калориметри.

## 14.1 Вимірювання імпульсного випромінювання

Для характеристики імпульсних джерел потрібно вимірювати максимальні значення сили струму, яскравості та інших величин для одного спалаху, інтегральні значення для інших характеристик, а також визначати форми кривих миттєвих значень сили струму і сили випромінювання  $I_a(t)$ ,  $I_{ea}(t)$  і вимірювати зміну інших миттєвих значень, що характеризують спалах імпульсного джерела випромінювання.

1. **Фотоелектричний метод** для визначення інтегральних світлотехнічних величин. Найпростіша схема імпульсного фотометра зображена на рисунку 14.1. При напрямку потоку випромінювання спалаху на катод вакуумного фотоелемента ( $\Phi E$ ), який підключено до ланцюга осцилографа, на екрані останнього можна отримати осцилограму спалаху, а по ній визначити її енергію. Якщо в ланцюг фотоелемента підключити інтегруючий ланцюжок і електронний вольтметр  $EB$ , тоді можна визначити інтегральні характеристики спалаху. При роботі слід стежити, щоб до моменту освітлення катода конденсор  $C$  інтегруючого ланцюжка був розряджений.

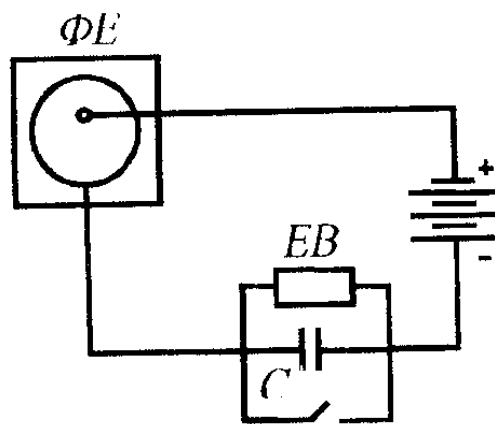


Рисунок 14.1 – Схема імпульсного фотометра

Для вимірювання інтегральних характеристик спалаху можна також застосовувати свічмір (рис. 14.2). Потік спалаху попадає на телецентричну систему (1) і прямує через отвір у діафрагмі (2) на лінзу розсіювання (3), за допомогою якої створюється рівномірне освітлення катода вакуумного  $\Phi E$  (4).

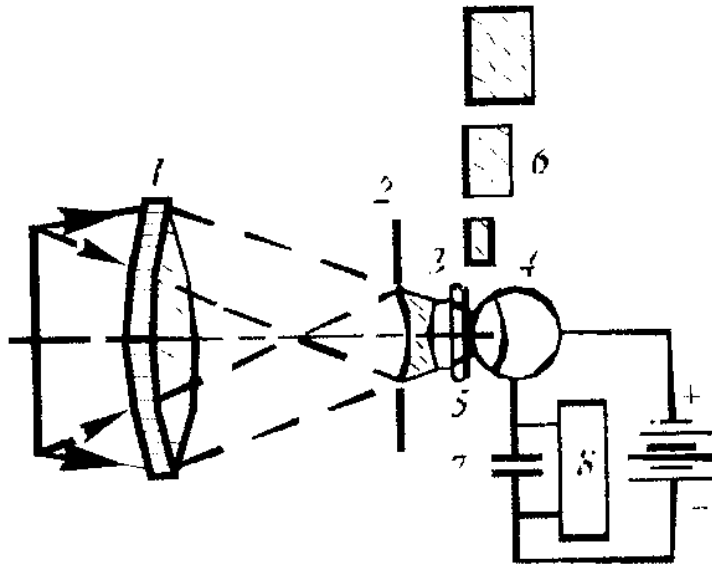


Рисунок 14.2 – Принципова схема свічєміра

Між лінзою розсіювання і фотоелементом розташовуються нейтральні світлофільтри (5) і (6), які розширюють межі вимірювання. Послідовно з фотоелементом підключений інтегруючий конденсатор (7). При освітленні катода фотоелемента спалахом світла конденсатор заряджується до напруги  $U$ , яка вимірюється ламповим вольтметром 8 із високоомним входом.

Для світлової енергії спалаху можна використати вираз:

$$Q = \Delta\omega\tau e^{\frac{-t}{RC}} \int_0^{t_{cn}} I_{\alpha}(t) dt, \quad (14.1)$$

де  $\Delta\omega$  – тілесний кут, який охоплює діафрагму;

$\tau$  – коефіцієнт пропускання оптики даної системи;

$e$  – основа логарифмів;

$t$  – стала часу ланцюжка  $RC$ ;

$R$  – вхідний опір лампового вольтметра;

$C$  – ємність конденсатора;

$I_{\alpha}(t)$  – миттєве значення сили струму в напрямку головної оптичної осі системи;

$t_{cn}$  – час спалаху.

Напруга, яка вимірюється ламповим вольтметром,

$$U = \frac{S_{\text{int}}}{C} \Delta \omega \tau e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^{t_{\text{cn}}} I_a(t) dt, \quad (14.2)$$

де  $S_{\text{int}}$  – інтегральна чутливість фотоелемента. Стала часу підбирається таким чином, щоб  $RC$  дорівнювалась  $200 t_{\text{cn}}$ .

Заряд, який отримає конденсатор  $C$  за час опромінення фотокатода, пропорційний енергії спалаху:

$$g = UC = S_{\text{int}} Q = c \Theta, \quad (14.3)$$

де  $Q$  – світова енергія спалаху в межах  $\Delta \omega$ ;

$c$  – коефіцієнт пропорційності;

$\Theta$  – освічування, яке визначається за формулою

$$\Theta = \int_0^{t_{\text{cn}}} I_a(t) dt \quad (14.4)$$

Проводячи вимірювання з еталонним спалахом, для якого відомий час освічування  $\Theta_e$ , маємо

$$U_e C = c \Theta_e. \quad (14.5)$$

Для досліджуваного спалаху  $U_x C = c \Theta_x$ .

$$\text{З наведеного вище випливає } \Theta_x = \Theta_e U_x / U_e. \quad (14.6)$$

**2. Фотографічний метод.** Кінознімальні камери, які сьогодні існують, не можуть забезпечити велику частоту кадрів за одиницю часу (1с), що необхідно для зйомки імпульсних спалахів. Спеціальні знімальні камери таку можливість забезпечують. Це спеціальні фотореєстратори з щілинною або дзеркальною розгорткою променя, в яких забезпечується велика швидкість руху зображення щілини по фотографічному полю. У деяких випадках зображення щілини, яка світиться, передається за допомогою дзеркала, що обертається (рис. 14.3).



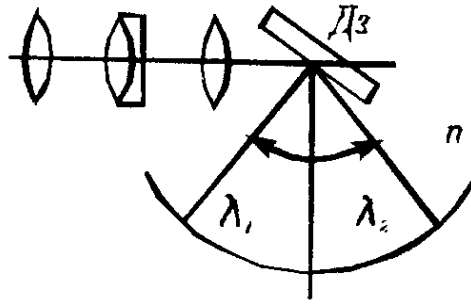


Рисунок 14.3 – Найпростіша схема дзеркальної розгортки фотореєстратора

Важливою характеристикою фотореєстратора є його роздільна здатність, яка за часом  $t_p$  дорівнює

$$t_p = \frac{b}{V_p}, \quad (14.7)$$

де  $b$  – ширина зображення щілини на фотошарі;

$V_p$  – швидкість розгортки зображення щілини.

У наш час є високошвидкісні фотореєстратори, які дозволяють давати ряд послідовних фотографій спалаху з частотою  $2 \cdot 10^6$  кадр./с. Один з таких пристроїв дає неперервну розгортку плоским дзеркалом з розділенням за часом  $t_p = 2 \cdot 10^{-8}$  с при ширині щілини 0,1 мм і  $V_p = 3750$  м/с.

**3. Калориметричний метод** використовує перетворення енергії випромінення спалаху (або її частини) за допомогою відповідного приймача випромінення у тепло. За кількістю отриманої теплової енергії, що утворилась при спалаху, можна судити про потужність останнього.

Приймачем випромінення може бути порожня металева кулька, внутрішня поверхня якої пофарбована у чорний колір, а зовнішня – покрита тонким шаром срібла. Якщо всередині такої кульки розмістити термопару і в її ланцюг включити балістичний гальванометр, то отримаємо створені калориметри для вимірювання енергії спалаху оптичного квантового генератора (ОКГ). Схема такого калориметра наведена на рисунку 14.4.

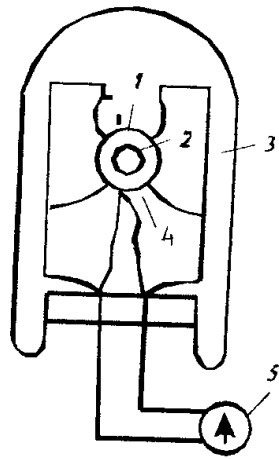


Рисунок 14.4 – Схема калориметра для вимірювання енергії спалаху

Порожня кулька (1) з тонкої мідної фольги з невеликим отвором (вікно 2) розміщується на скляних гачках у скляній колбі (3), з якої викачано повітря. До стінки кулі припаяно термопару (4), в ланцюг якої підключено гальванометр (5). За максимальним відхиленням стрілки гальванометра можна судити про енергію спалаху, яка утворилась всередині кулі. Похибки, які виникають при таких вимірюваннях, пов'язані з охолодженням кулі через теплове випромінення.

Для вимірювання енергії вузько направленої імпульсної лазера використовують конусний калориметр. Енергія спалаху поглинається в цьому випадку конусним навантаженням з малим кутом розкриття. Нагрів конуса реєструється великою кількістю послідовно з'єднаних термопар мідь-константан, які розташовані по всій довжині твірної конуса. Вся термочутлива частина конусного калориметра вміщена в термоізолюючий кожух з отворами для проходження пучка променів ОКГ в один з конусів. Поглинена енергія випромінення визначається за максимальним нагрівом конусного навантаження.

Похибки вимірювань параметрів випромінення імпульсних джерел світла сильно залежать від порядку й умов проведення досліджень. Навіть при наявності комплексу вимірювальних засобів і зразків джерел енергетичні імпульсні вимірювання в лабораторних умовах можуть бути виконані з похибкою 10 %. Практично у більшості випадків похибка вимірювання

знаходиться в межах 10–20 %. Однак якщо комплекс вимірювальних засобів дозволяє проводити градування фотометра або радіометра безпосередньо перед вимірюванням, а також вилучати основну частину систематичних похибок, які пов'язані з неоднаковим спектральним розподілом випромінення і різною спектральною чутливістю фотоприймачів, то похибка енергетичних імпульсних вимірювань може бути зменшена. При цьому слід пам'ятати, що вимірювання спектрального розподілу випромінення імпульсних ламп одержується шляхом послідовного вимірювання спектральної щільності випромінення у фіксованих спектральних інтервалах для окремих спалахів (імпульсів) при частотному режимі роботи лампи.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назаренко Л. А. Основи радіометрії і фотометрії : монографія / Л. А. Назаренко, В. М. Сорокін. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 351 с.
2. Иванов В. С. Основы оптической радиометрии / В. С. Иванов, Ю. М. Золотаревский, А. Ф. Котюк. – М. : Физматлит, 2003. – 544 с.
3. Меншикова В. Л. Химический анализ в энергетике. Кн.1 Фотометрия / В. Л. Меншикова. – М. : Дом МЭИ, 2008. – 407 с.
4. Будаков В. П. Визуализация распределения яркости в трехмерных сценах наблюдения / В. П. Будаков. – М. : МЭИ, 2000. – 135 с.
5. Справочная книга по светотехнике. / Под ред. Ю. Б. Айзенберга; 3-е издание. – М. : Знак, 2006. – 972 с.

*Навчальне видання*

**ПОЛІЩУК** Валентина Миколаївна

## **ФОТОМЕТРІЯ**

### **КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів денної та заочної форм навчання  
освітнього рівня «бакалавр» за спеціальністю  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *Ю. О. Васильєва*  
*За авторською редакцією*  
Комп'ютерне верстання *В. М. Поліщук*

План 2016 , поз. 105Л.

---

Підп. до друку 21.02.2020. Формат 60 × 84 / 16.  
Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 9,1  
Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.